

# Naturalne zatrzymywanie wody (Rezerwat biosfery Karpat Wschodnich)

Tomáš Lepeška

Warszawa, 2025

Ogólnopolskie Towarzystwo Ochrony Ptaków

*Projekt „Opierające się na danych działania na rzecz zrównoważonego zarządzania transgranicznym rezerwatem biosfery Karpat Wschodnich” jest współfinansowany przez rządy Czech, Węgier, Polski i Słowacji w ramach Międzynarodowego Funduszu Wyszehradzkiego. Misją funduszu jest promowanie idei zrównoważonej współpracy regionalnej w Europie Środkowej.*



## Streszczenie

Skuteczne zarządzanie retencją wody w ekosystemie wymaga kompleksowego zrozumienia procesów hydrologicznych w skali krajobrazu oraz ich przestrzennej niejednorodności. Niniejsze badanie dotyczy potencjału wodnego i dynamiki spływu w wybranych zlewniach górskich rezerwatu biosfery Karpat Wschodnich, koncentrując się na wzajemnym oddziaływaniu topografii, geologii, właściwości gleby i pokrycia terenu. Wykorzystując połączenie wskaźnika wilgotności topograficznej (TWI) i wskaźnika potencjału wodnego krajobrazu (LHP), oceniliśmy przestrzenną zdolność ekosystemów do zatrzymywania opadów i łagodzenia spływu powierzchniowego. Wskaźnik TWI został wyprowadzony z cyfrowego modelu wysokościowego, uwzględniającego dane dotyczące akumulacji przepływu i nachylenia terenu, przy jednoczesnym uwzględnieniu warunków nachylenia zerowego w celu uniknięcia błędów obliczeniowych. Wskaźnik LHP został obliczony na podstawie ważonej integracji kluczowych warstw środowiskowych, w tym opadów, ewapotranspiracji, geomorfologii, zdolności infiltracji gleby, hydrogeologii podłoża skalnego i pokrycia terenu.

Wyniki wykazały wyraźną zmienność przestrzenną potencjału retencji wody. Obszary o wysokich wartościach TWI i doskonałych wartościach LHP były głównie związane z płaskimi dolinami aluwialnymi z osadami rzecznyymi, grubą warstwą gleby i pokryciem terenu lasami, podczas gdy regiony o płytkiej glebie, stromych zboczach i geologii zdominowanej przez flisz wykazywały niskie lub znacznie ograniczone wartości LHP. Obszary te charakteryzowały się również wysoką podatnością na szybki spływ powierzchniowy i procesy erozji.

W oparciu o klasyfikację LHP zaproponowaliśmy dostosowane do potrzeb zalecenia dotyczące zarządzania dla każdej kategorii. Na obszarach o doskonałym lub wysokim potencjale wodnym nacisk kładzie się na ochronę, zwiększanie różnorodności biologicznej i unikanie intensyfikacji użytkowania gruntów. W przypadku kategorii średniej i ograniczonej zaleca się środki adaptacyjne, takie jak kontrola erozji, stabilizacja zboczy i zalesianie gatunkami rodzimymi. Obszary o znacznie ograniczonym potencjale, często narażone na osunięcia ziemi i o niewielkiej zdolności infiltracji, wymagają bardzo restrykcyjnego zarządzania, w tym ocen geotechnicznych, starannego planowania infrastruktury oraz wykluczenia intensyfikacji rolnictwa lub interwencji związanych z retencją wody, które mogłyby pogłębić niestabilność zboczy.

Nasze ustalenia podkreślają znaczenie integracji modelowania hydrologicznego z danymi środowiskowymi o wyraźnym charakterze przestrzennym w celu ukierunkowania planowania krajobrazu opartego na dowodach. Badanie podkreśla, że chociaż retencja wody jest kluczową usługą ekosystemową, musi ona być dostosowana do kontekstu, szczególnie na obszarach, gdzie zwiększona wilgotność gleby może prowadzić do nieodwracalnej degradacji krajobrazu.

## **Rysunki i tabele**

Rysunek 1 Rezerwat biosfery Karpat Wschodnich

Rysunek 2 Rodzaje warstw wodonośnych w ECRB

Rysunek 3 Warunki geomorfologiczne ECRB

Rysunek 4 Kategorie TWI w ECRB

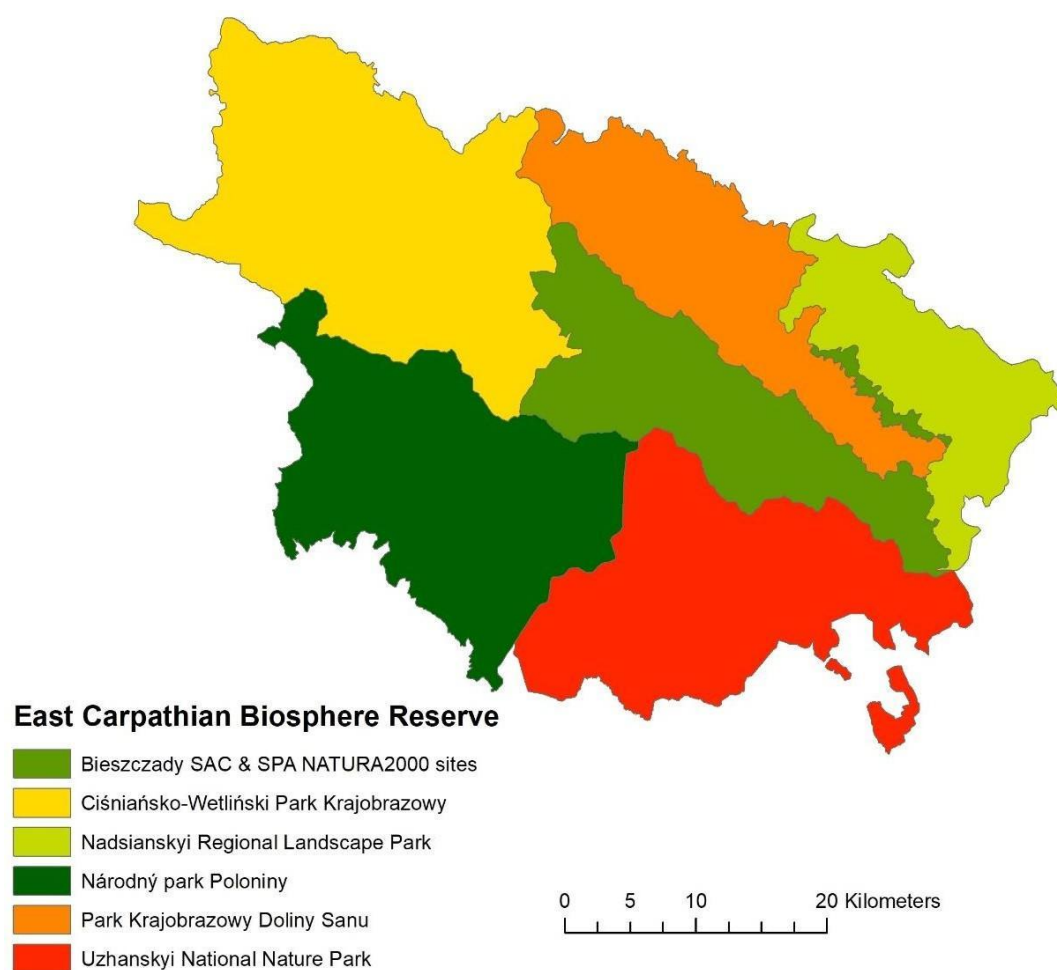
Rysunek 5 Rozkład przestrzenny wskaźnika potencjału wodnego krajobrazu w polskiej i słowackiej części ECRB

Tabela 1 Klasyfikacja TWI w ECRB

## Przedmowa

Naturalna retencja wody jest kluczowym elementem zrównoważonego gospodarowania zasobami wodnymi, zwłaszcza na obszarach wrażliwych ekologicznie i dynamicznych hydrologicznie, takich jak Rezerwat Biosfery Karpat Wschodnich. Niniejszy raport ma na celu zapewnienie kompleksowego zrozumienia mechanizmów naturalnej retencji wody w tym regionie, analizę wpływu czynników geologicznych, glebowych i roślinnych oraz identyfikację wyzwań i możliwości skutecznego gospodarowania wodą.

Rezerwat Biosfery Karpat Wschodnich (ECBR – rys. 1) to transgraniczny obszar chroniony obejmujący Polskę, Słowację i Ukrainę. Słynie z wysokiej różnorodności biologicznej, unikalnej mozaiki krajobrazowej i znaczących usług ekosystemowych, w tym naturalnej retencji wody. Jednak badania naukowe i monitorowanie środowiska w tym trójnarodowym regionie napotykają poważne wyzwania ze względu na różnice w dostępności danych, zwłaszcza dotyczących ukraińskiej części rezerwatu.



Rys. 1 Rezerwat biosfery Karpat Wschodnich

Istotnym ograniczeniem w transgranicznych badaniach środowiskowych jest nierównomierny rozkład i dostępność zbiorów danych geoprzestrzennych i ekologicznych. Podczas gdy Polska i Słowacja dysponują stosunkowo kompleksowymi i ogólnodostępnymi bazami danych środowiskowych – od wysokiej rozdzielczości zdjęć teledetekcyjnych, szczegółowych map użytkowania gruntów/pokrycia terenu, po zbiory danych hydrologicznych i glebowych – na terytorium Ukrainy odnotowuje się wyraźny niedobór takich otwartych i

standardowych danych. Na ten niedobór wpływa kilka czynników, w tym ograniczenia historyczne, fragmentacja instytucjonalna, ograniczone działania w zakresie digitalizacji oraz ograniczenia w polityce udostępniania danych w Ukrainie.

Niedobór dostępnych, wysokiej jakości zbiorów danych dotyczących ukraińskiej części ECBR ma kilka implikacji naukowych i praktycznych:

1. **Zmniejszona precyzja analityczna:** Brak szczegółowych, spójnych danych ogranicza możliwość przeprowadzania szczegółowych analiz przestrzennych i dokładnego modelowania procesów ekologicznych związanych z naturalnym zatrzymywaniem wody. W rezultacie wyniki modelowania dla obszaru Ukrainy często opierają się na mniej dokładnych, nieaktualnych lub pośrednich danych zastępczych, co zmniejsza wiarygodność transgranicznych badań porównawczych.
2. **Nierównowaga w porównaniach transgranicznych:** Ze względu na zróżnicowaną rozdzielczość i jakość danych wyniki badań często wykazują nieodłączną tendencję do faworyzowania terytoriów Polski i Słowacji. Prowadzi to do nierównomiernego przedstawienia warunków ekologicznych i potrzeb w zakresie zarządzania, co komplikuje wysiłki na rzecz zintegrowanego planowania ochrony i zarządzania zasobami naturalnymi w całym rezerwacie.
3. **Przeszkody w ocenie usług ekosystemowych:** Naturalna retencja wody – kluczowa usługa ekosystemowa w ECBR – jest bardzo wrażliwa na przestrzenną niejednorodność właściwości gleby, pokrycia terenu i topografii. Ograniczone dane dotyczące Ukrainy utrudniają kompleksową ocenę tej usługi w skali regionalnej, co utrudnia sformułowanie skutecznych transgranicznych polityk zarządzania wodą w kontekście adaptacji do zmian klimatu.

Aby złagodzić te problemy, konieczne są wspólne wysiłki na rzecz harmonizacji metod gromadzenia danych i promowania inicjatyw dotyczących otwartych danych z udziałem instytucji ukraińskich. Postępy w technologiach teledetekcyjnych, w tym swobodnie dostępne zdjęcia satelitarne i globalne cyfrowe modele terenu, mogą częściowo zrekompensować braki w danych terenowych. Ponadto ramy współpracy międzynarodowej i programy budowania potencjału mają zasadnicze znaczenie dla poprawy infrastruktury danych, zwiększenia umiejętności korzystania z technologii cyfrowych oraz wspierania przejrzystych umów o wymianie danych na Ukrainie.

Podsumowując, rozwiązanie problemu braku dostępnych i znormalizowanych zbiorów danych w ukraińskiej części Rezerwatu Biosfery Karpat Wschodnich ma kluczowe znaczenie dla poprawy jakości, spójności i przydatności badań naukowych. Umożliwi to bardziej sprawiedliwą transgraniczną ocenę stanu środowiska, zapewni podstawy do zrównoważonego zarządzania zasobami naturalnymi i wesprze długoterminową ochronę tego cennego transgranicznego ekosystemu.

## 1. Wprowadzenie

Dlaczego infiltracja i retencja opadów atmosferycznych są ważne? W jaki sposób przyczyniają się one do poprawy procesów spływu i jakości zasobów wodnych? Odpowiedzi należy szukać w podstawowych zasadach reżimu wodnego środowiska geologicznego – poprzez jakie ścieżki opady przedostają się do gleby, środowiska hydrogeologicznego, jak długo woda jest zatrzymywana w ekosystemach, jaka jej część spływa po powierzchni, jaka część wyparowuje, a jaka część infiltruje do gleby i warstw skalnych. W hydrologii retencja rozumiana jest jako naturalne lub sztuczne (zazwyczaj krótkotrwałe) zatrzymywanie wody w krajobrazie (ekosystemie). Woda ta może być tymczasowo magazynowana w różnych elementach krajobrazu – roślinności, humusie powierzchniowym, profilu gleby, korycie rzeki – lub za pomocą środków technicznych i infrastruktury, takich jak zbiorniki, poldery itp. Infiltracja opadów i ich późniejsze zatrzymywanie są kluczowymi czynnikami spowalniającymi spływ z terenu i przekształcającymi przepływy szczytowe i powodziowe. Umożliwiając infiltrację i retencję, zmniejszamy natychmiastowe odpływy powodziowe, jednocześnie wydłużając czas trwania podwyższonych przepływów, co skutkuje dłuższym i bardziej regularnym zaopatrzeniem konsumentów w wodę. Jest to niewątpliwie prawda, ale stanowi jedynie częściową odpowiedź na pytanie postawione na początku tego rozdziału. Koncentruje się ono wyłącznie na ilości wody. Musimy również poruszyć kwestię jakości, a także dostępności i rozmieszczenia przestrzennego i czasowego zasobów wodnych. Przyspieszony spływ spowodowany zmniejszoną retencją wody w krajobrazie wpływa na natężenie przepływu, występowanie susz (zarówno hydrologicznych, jak i rolniczych) oraz poziom wód gruntowych. Szybki spływ intensyfikuje również erozję gleby, zmienia reżim sedimentacyjny i ostatecznie pogarsza jakość wód powierzchniowych (strumieni, zbiorników wodnych) poprzez zwiększenie ilości substancji rozpuszczonych i zawieszonych, a także wód podpowierzchniowych, które są zanieczyszczone substancjami odżywczymi i ksenobiotykami wypłukiwanymi z profilu glebowego. Od połowy XX wieku kształcono pokolenia zarządców zasobów wodnych, rolników i leśników, którzy mogli – i powinni – podchodzić do zarządzania gruntami i zasobami naturalnymi w sposób kompleksowy. W kontekście retencji wody oznacza to dbanie o funkcje retencyjne i akumulacyjne krajobrazu. Jednak wyniki są widoczne już dziś: rozwiązania kluczowych problemów związanych z wodą (powodzie, susze, erozja gleby i zanieczyszczenie wody) nadal są rozpatrywane w izolacji.

Naturalne zatrzymywanie wody w krajobrazie jest kluczowym procesem leżącym u podstaw stabilności hydrologicznej, odporności ekologicznej i bezpieczeństwa wodnego. Odzwierciedla ono zdolność ekosystemów i ukształtowania terenu do przechwytywania, infiltracji i tymczasowego magazynowania opadów, zanim przyczynią się one do spływu powierzchniowego lub zasilania wód gruntowych. Funkcja ta nie jest jednolita we wszystkich regionach – kształtuje ją złożona interakcja naturalnych cech krajobrazu i wzorców użytkowania gruntów. W kolejnej części niniejszego raportu skupię się na konkretnym wpływie wybranych cech krajobrazu i ekosystemu na retencję opadów. Celem jest zidentyfikowanie i opisanie mechanizmów, poprzez które różne czynniki naturalne i antropogeniczne przyczyniają się do wzmocnienia lub osłabienia funkcji retencyjnej krajobrazu. Podejście to stanowi podstawę do oceny potencjału retencji wody i implikacji dla zarządzania retencją wody.

## 2. Czynniki krajobrazowe i ekosystemowe determinujące naturalne zatrzymywanie wody

### 2.1 Opady i ewapotranspiracja jako kluczowe czynniki klimatyczne wpływające na retencję wody

Na retencję wody w ekosystemach lądowych zasadniczy wpływ mają warunki klimatyczne, przy czym opady i ewapotranspiracja stanowią dwa główne strumienie regulujące dopływ i odpływ wody w systemie gleba-roślinność-atmosfera. Ich wielkość, rozkład czasowy i zmienność przestrzenna determinują ogólny bilans wodny, wpływają na procesy hydrologiczne w wielu skalach i kształtują zdolność ekosystemu do zatrzymywania i regulowania wody. Opady atmosferyczne są głównym mechanizmem przenoszenia wilgoci atmosferycznej na powierzchnię Ziemi. Obejmują one wszystkie formy wody, płynnej lub stałej, które spadają z atmosfery, takie jak deszcz, śnieg, deszcz ze śniegiem i grad. Z hydrologicznego punktu widzenia ilość, częstotliwość, intensywność i sezonowy rozkład opadów mają kluczowe znaczenie dla określenia ilości i zmienności wody dostępnej do infiltracji, spływu powierzchniowego, zasilania wód gruntowych oraz magazynowania w glebach i roślinności.

Na reżimy opadów duży wpływ mają regionalne wzorce klimatyczne (np. wpływy atlantyckie, kontynentalne lub śródziemnomorskie w Europie), efekty orograficzne i systemy cyrkulacji atmosferycznej. Na obszarach górskich i zalesionych, takich jak Karpaty, opady mogą się znacznie różnić na niewielkich odległościach ze względu na gradienty wysokości i czynniki mikroklimatyczne. Międzyroczna i sezonowa zmienność opadów odgrywa decydującą rolę w uzupełnianiu wilgotności gleby i warstw wodonośnych. Długotrwałe okresy suszy (susze meteorologiczne) zmniejszają potencjał infiltracji i retencji, natomiast intensywne opady często przekraczają zdolność infiltracji gleby, co prowadzi do zwiększonego spływu powierzchniowego, erozji gleby i gwałtownych powodzi. Ewapotranspiracja (ET) obejmuje sumę strumienia pary wodnej z dwóch procesów: parowania, które odnosi się do fizycznej utraty wody z gleby, zbiorników wodnych i mokrych powierzchni; oraz transpiracji, która polega na biologicznym uwalnianiu pary wodnej przez rośliny poprzez aparaty szparkowe podczas fotosyntezy. Procesy te stanowią dominującą formę utraty wody z systemu lądowego, zwłaszcza w okresie wegetacyjnym. Ewapotranspiracja jest złożoną funkcją wielu zmiennych klimatycznych, w tym promieniowania słonecznego, temperatury powietrza, wilgotności względnej, prędkości wiatru i gradientu ciśnienia pary wodnej między powierzchnią roślin/gleby a atmosferą. Wielkość ET zależy również od pokrycia terenu, rodzaju roślinności, wskaźnika powierzchni liści (LAI), głębokości korzeni i dostępności wilgoci w glebie. W klimacie umiarkowanym potencjalna ewapotranspiracja (PET) może przekraczać opady w miesiącach letnich, zwłaszcza w warunkach długotrwałych wysokich temperatur i niskiej wilgotności. Powoduje to deficyt klimatyczny wody, który zmniejsza ilość wody zatrzymywanej w glebie i warstwach podglebia i może prowadzić do suszy rolniczej i ekologicznej.

Ponadto oczekuje się, że zmiany klimatu spowodują nasilenie zarówno ekstremalnych opadów, jak i zapotrzebowania na ewapotranspirację. Rosnące temperatury, zmiany fenologii roślinności i zwiększona częstotliwość fal upałów mogą zwiększyć zapotrzebowanie atmosfery na wodę i zmienić sezonowy bilans wodny, potencjalnie zmniejszając naturalną zdolność retencji wody, szczególnie w ekosystemach już podatnych na stres wodny. Dynamiczna równowaga między opadami a ewapotranspiracją określa bilans wodny klimatu i ma bezpośredni wpływ na ilość wody dostępnej do retencji w ekosystemach. W regionach, w których opady stale przewyższają ewapotranspirację, nadwyżka wody przyczynia się do infiltracji, zasilania wód gruntowych i przepływu strumieni. Natomiast gdy ewapotranspiracja przewyższa opady, zdolności retencyjne maleją, gleby wysychają, a ekosystemy stają się bardziej podatne na stres hydrologiczny.

Zrozumienie przestrzennych i czasowych interakcji między tymi dwoma kluczowymi zmiennymi klimatycznymi ma zatem zasadnicze znaczenie dla oceny funkcji retencji wody w krajobrazie, oceny odporności ekosystemów na zmienność klimatu oraz kierowania strategiami gospodarowania gruntami i wodą mającymi na celu utrzymanie usług hydrologicznych.

W niniejszym badaniu, mającym na celu oszacowanie przestrzennej różnorodności cech klimatycznych, wykorzystaliśmy miesięczne dane klimatyczne (opady i potencjalna ewapotranspiracja) z bazy danych WorldClim (Fick i Hijmans, 2017). Zakres czasowy zbioru danych: 2018 r. Roczne opady w Karpatach różnią się znacznie w zależności od wysokości i/lub warunków orograficznych. W niektórych obszarach depresyjnych całkowite roczne opady mogą osiągać mniej niż 600 mm. Jednak w obszarach górskich opady znacznie wzrastają, a ich roczna suma przekracza 1500 mm (Mostowik et al. 2019). Oceniając bilans wilgotności w ECBR, należy również wziąć pod uwagę całkowitą ewapotranspirację, której średnie roczne wartości rzadko przekraczają  $500 \text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$  (głównie w zakresie  $400\text{-}450 \text{ mm}\cdot\text{r}^{-1}$ ).

Strumienie w tym regionie – takie jak Cirocha, Uzh, San i ich dopływy – charakteryzują się reżimem karpackim z maksymalnym przepływem wiosną (topnienie śniegu) i drugorzędny maksymalny przepływ latem (opady). Obszar ten jest podatny na ulewne deszcze, które powodują nagły wzrost przepływu – tzw. „gwałtowne powodzie”. Krótki czas opóźnienia opadów i spływu powierzchniowego jest związany ze nachyleniem zboczy, niską retencyjnością gleby i podłożem flyszowym. Strumienie są głównie I i II rzędu, z dużymi wahaniami przepływów. W strefach aluwialnych zdarzają się sporadyczne powodzie, zwłaszcza w dolinach San i Cirocha, co stwarza korzystne warunki dla naturalnej retencji na terenach zalewowych.

## 2.2 Czynniki geologiczne i hydrogeologiczne oraz retencja wody

Przestrzeń retencyjna w glebie i skałach jest trudna do wykrycia gołym okiem, ale ma kluczowe znaczenie dla retencji wody. Zatrzymywanie wody w trójwymiarowej przestrzeni krajobrazu jest kluczową potrzebą, zwłaszcza w warunkach zmian klimatycznych. Wynika z tego, że zrozumienie ruchu wody w danym obszarze, od opadów atmosferycznych, poprzez spływ podskórny i podziemny, aż po odprowadzanie wody do spływu powierzchniowego w dowolnej postaci, musi być postrzegane jako jeden wspólny zbiór zdarzeń, nawet jeśli ten zbiór składa się z różnej liczby lub znaczenia poszczególnych zdarzeń w różnych częściach zlewni. Występowanie wód podpowierzchniowych jest jednym z ważnych elementów tego zestawu, a ponieważ spływ podpowierzchniowy jest między innymi funkcją struktury geologicznej i właściwości hydrogeologicznych obszaru, poświęcamy mu osobny artykuł.

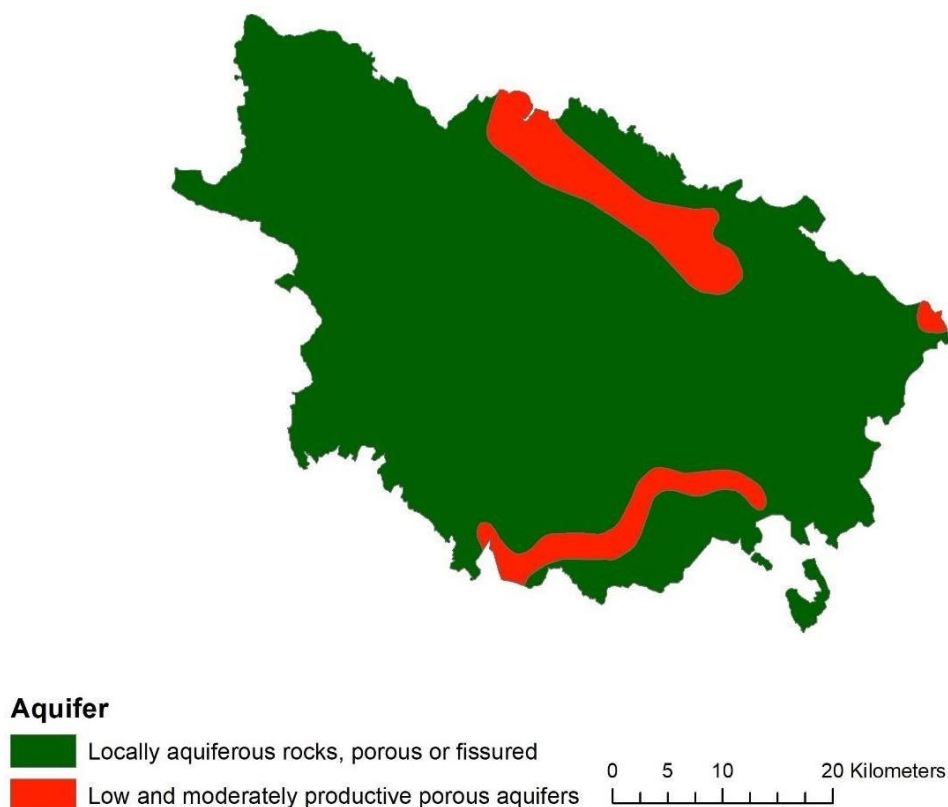
Struktura geologiczna Rezerwatu Biosfery Karpat Wschodnich ma zasadniczy wpływ na procesy hydrologiczne, w tym infiltrację, gromadzenie się wód gruntowych i dynamikę spływu. Z punktu widzenia warunków geologicznych (tektonicznych) ECBR rozciąga się prawie wyłącznie na skałach flyschowych płaszczowiny Magura, jednostki tektonicznej Dukla, jednostki tektonicznej Predukla, jednostki tektonicznej Śląska i jednostki tektonicznej Podśląska (Haczewski et al. 2007; Jankowski C Margielwski 2021).

Pod względem litologicznym dominują piaskowce o średniej lub grubej warstwie, często przeplatające się z mniej przepuszczalnymi mułowcami. Obszar ten zawiera również bardziej miękkie margle, zlepieńce i intruzje węglanowe, które mają mniejsze znaczenie. Kompleks flyszowy ma złożoną strukturę tektoniczną – w postaci nasuwanych płaszczowin, z częstymi strefami osiadania i pęknięciami. Struktura ta ma znaczący wpływ na przepływ wody i jej gromadzenie się – zwłaszcza w pęknięciach i

między przepuszczalnymi horyzontami piaskowcowymi. Skały te charakteryzują się wysoką dezintegracją mechaniczną, co powoduje niestabilność zboczy, osuwiska i procesy erozyjne, co znacząco wpływa na retencję wody w glebie i w szerszym krajobrazie.

Wymienione powyżej jednostki tektoniczne są prawie w całości utworzone przez flysch, czyli sekwencje warstw piaskowca i łupków ilastych. Warstwy wodonośne flyschu są zazwyczaj zasilane przez okresowe źródła o niskim natężeniu przepływu. Skały te charakteryzują się niską pojemnością magazynową (zazwyczaj poniżej 6% porowatości) i niską przewodnością hydrauliczną (od  $1,4 \times 10^{-6}$  do  $2,4 \times 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Przepływ wody w tych warstwach wodonośnych odbywa się głównie poprzez systemy szczelin lub szczelinowo-porowate. Połączenie stromych zboczy i niskiej zdolności retencyjnej podłoża, wraz z gęstą siecią drenażową, ogranicza gromadzenie się wód gruntowych i sprzyja szybkiemu spływowi powierzchniowemu.

Cechy hydrogeologiczne zostały wybrane zgodnie z poziomem wydajności warstwy wodonośnej. Wydajność warstwy wodonośnej opisuje potencjał warstwy wodonośnej (podłoża skalnego lub powierzchniowej jednostki osadowej zawierającej znaczne ilości wód gruntowych) do utrzymania różnych poziomów przepływu wód gruntowych (O Dochartaigh i in., 2011). Wydajność warstwy wodonośnej to zdolność podłoża skalnego do uwalniania (wytwarzania) w określonych, porównywalnych warunkach wody gruntowej pod wpływem grawitacji wynikającej z gradientu hydraulicznego. Bezpośrednim wskaźnikiem (cechą ilościową) tej zdolności jest współczynnik przepuszczalności. W niniejszym badaniu jako podstawę do obliczenia wydajności warstwy wodonośnej wykorzystano Międzynarodową Mapę Hydrogeologiczną Europy w skali 1:1500 000 – IHME1500 (BGR, 2015). Zakres czasowy zbioru danych IHME1500: 2019 r. Lokalnie skały wodonośne, porowate lub spękane, stanowią dominującą klasę hydrogeologiczną warstw wodonośnych, natomiast na terenach zalewowych większych cieków wodnych znajdują się warstwy wodonośne o niskiej i umiarkowanej wydajności – rys. 2 (BGR, 2015).



### 2.3 Charakterystyka gleby i hydropedologiczna

Ilość wody w warstwie wietrzenia gleby oraz jej rozkład czasowo-przestrzenny zależą od zdolności gleby do pochłaniania opadów, zatrzymywania ich w swojej przestrzeni oraz od przemieszczania się wody w glebie. Woda opadowa, która przenika do gleby, jest najważniejszym źródłem wody podpowierzchniowej. Znajomość i zrozumienie zdolności gleby do infiltracji i retencji wody jest kluczowym warunkiem racjonalnego wykorzystania terenu i opracowania propozycji działań rewitalizacyjnych. Każda gleba w swojej przestrzeni jest narażona na pewne obciążenia – najczęściej postrzegane jako skutek negatywnych procesów, takich jak naruszenie gleby i erozja, jej ponowne osadzenie się, przyspieszona mineralizacja próchnicy, zagęszczenie, utrata składników odżywczych itp. Po przekroczeniu pewnej granicy niektóre właściwości gleby, takie jak grubość, porowatość, gęstość nasypowa, wielkość ziaren, właściwości biologiczne, mogą ulec zmianie (pogorszeniu). W skrajnych przypadkach dochodzi do utraty gleby lub powstania tzw. gleb porzuconych, kiedy gleba gwałtownie powraca do początkowych etapów rozwoju. Presja antropogeniczna na środowisko glebowe rośnie i prowadzi do intensywnych zmian, w kolejności według ważności: erozji, zagęszczenia gleby, zanieczyszczenia, zakwaszenia i odzakwaszenia.

Dobra kondycja warstwy gleby gwarantuje niższe koszty związane z likwidacją skutków niekorzystnych warunków pogodowych – intensywnych opadów deszczu, okresów suszy – oraz sprzyja uzyskaniu korzystniejszego efektu wodnego gleby. Przekłada się to pozytywnie na zachowanie ilości, jakości, dostępności oraz rozkładu czasowego i przestrzennego zasobów wodnych. W ostatnich latach pogoda staje się coraz bardziej ekstremalna, a rola gleb będzie coraz ważniejsza w łagodzeniu fal powodziowych, spływu powierzchniowego, ale także w łagodzeniu skutków suszy meteorologicznej w ekosystemach leśnych, agroekosystemach, a także w całym kraju.

Lekkie gleby szkieletowe (piaszczyste, żwirowe, kamieniste) o niskiej zawartości próchnicy i materii organicznej wysychają szybciej i w większym stopniu, a odwrotnie, nawilżają się wolniej i w mniejszym stopniu. Wynika to głównie z kapilarnego podnoszenia się wody z poziomu wód gruntowych, w mniejszym stopniu z procesów redukcji w zwartych większych ziarnach minerałów pierwotnych, z większej utraty wody w wyniku parowania itp. Infiltracja wody atmosferycznej z opadów do gleby nie stanowi problemu ze względu na wysoką przepuszczalność masy glebowej. W glebie nie tworzą się strefy redukcji-utleniania. Ciężkie gleby o większej zawartości materii organicznej i próchnicy wysychają wolniej i szybciej się nawilżają. Łatwiej zachodzą bardziej rozległe procesy redukcji związków chemicznych w stanie koloidalnym, a także znacząca jest duża pojemność objętościowa materii organicznej (torf, humolit) dla wody. Ze względu na wysoką zdolność wiązania i mniejszą makroporowatość gleby gliniaste charakteryzują się mniejszym parowaniem, co jest również przyczyną ich większego podmoknięcia.

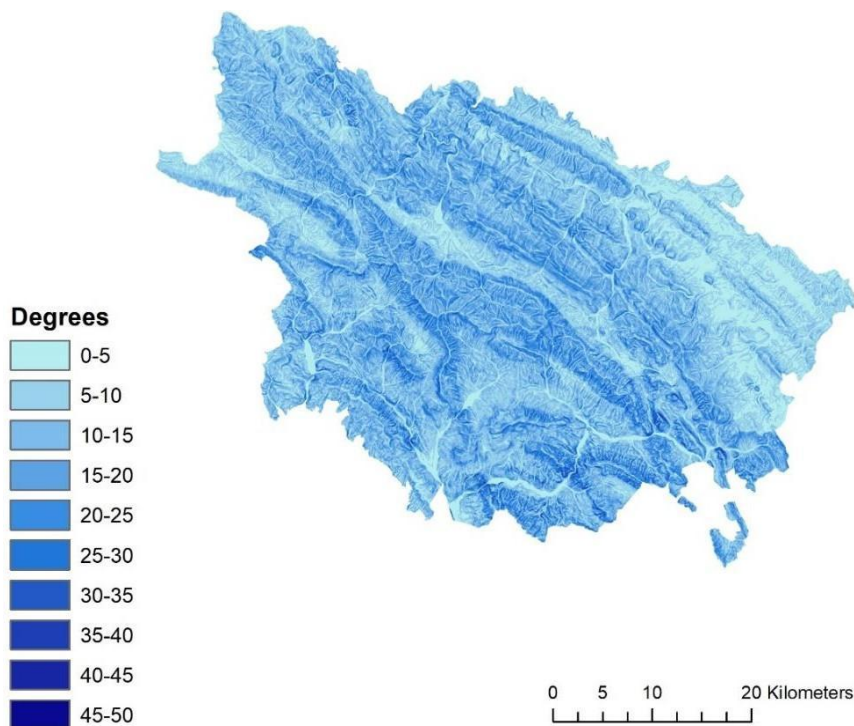
Zdolność gleby do zatrzymywania opadów zależy w szczególności od rodzaju gleby i zawartości próchnicy (Charman i Murphy, 1998). Bezpośrednim wskaźnikiem retencji wody w glebie w zależności od jej rodzaju jest nasycona zawartość wody. Aby oszacować nasyconą zawartość wody, wykorzystaliśmy mapę właściwości hydraulicznych gleby Europejskiego Centrum Danych o Glebie – *ESDAC SHP* (ESDAC SHP, 2016; Tóth i Weynants, 2016). Zakres czasowy zbioru danych *ESDAC SHP*: 2016 r. Ze względu na zawartość wody nasyconej według Tóth i Weynants (2016) typy gleb podzielono na trzy grupy: niską ( $< 0,40 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ ), umiarkowaną ( $0,40 - 0,50 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ ) i wysoką ( $> 0,50 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ ). W ramach ECRB opracowano typy gleb o wysokiej zawartości wody nasyconej.

Intensywność infiltracji opadów do gleby zależy w szczególności od jej tekstury (Zachar, 1982; Leeper, Uren, 1993). Aby oszacować właściwości tekstury gleby, wykorzystaliśmy Europejską Bazę Danych Gleby v2.0 – *ESDB* (ESDB, 2004; Panagos, 2006). Zakres czasowy zbioru danych *ESDB*: 2022. Wartości tekstury gleby oszacowano z uwzględnieniem hydrologicznych grup gleb (Hong i Adler, 2008; Ross i in., 2018), tekstury gleby oraz trójkątów szybkości infiltracji gleby (Berhanu i in.,

2013, Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych, 2017). W ECBD dominują gliny i gliny piaszczysto-ilaste. Pokrywy zboczy są głównie mulisto-ilaste, co determinowało dominujące procesy geomorfologiczne, takie jak ruchy masowe, erozja wąwozowa, rurowanie gleby i wyrwanie drzew (Rączkowska et al. 2012).

## 2.4 Warunki geomorfologiczne i procesy spływu powierzchniowego

Obszar badań charakteryzuje się rzeźbą strukturalną (Haczewski i in. 2007; Górczyca i in. 2016). Główne grzbiety są stosunkowo wąskie i wydłużone, biegną od północnego zachodu w kierunku południowo-wschodnim (rys. 3). Powstały one w stosunkowo odpornych piaskowcach, natomiast doliny są wyżłobione w mniej odpornych skałach, głównie łupkach ilastych i mułowcach (Henkiel 1982; Haczewski i in. 2007). Wysokość grzbietów wzrasta w kierunku południowo-wschodnim do 1300 m n.p.m., a najwyższym szczytem jest Tarnica (1346 m n.p.m.). Również wysokość dna dolin wzrasta w tym samym kierunku. Względne wysokości wynoszą do 700 m n.p.m. i wynikają ze znacznego wcięcia rzek, ułatwionego przez intensywne wypiętrzenie terenu ECBR. Nachylenie zboczy jest jednym z najważniejszych czynników geomorfologicznych wpływających na intensywność infiltracji i retencję opadów. Wzrost nachylenia zboczy prowadzi do wzrostu spływu powierzchniowego, zmniejszając zdolność zatrzymywania wody w środowisku i zmniejszając intensywność jej infiltracji. Kategorie nachylenia zboczy zostały określone na podstawie krzywej zależności między intensywnością spływu powierzchniowego a nachyleniem zbocza (Midriak, 1988; Lepeška, 2010). Aby oszacować różnorodność przestrzenną atrybutu warunków geomorfologicznych, wykorzystaliśmy cyfrowy model wysokościowy Europy Copernicus – *Copernicus EU-DEM* (Neteler et al., 2022). Zakres czasowy zbioru danych *Copernicus EU-DEM*: 2022 r. Na obszarze objętym modelem ECBR dominują zbocza o nachyleniu 0-7° i 7,1-18°. Często występują również bardziej strome części zboczy, które koncentrują się głównie na obszarach o dużym ukształtowaniu terenu. Zbocza te skupiają się w głęboko wciętych dolinach górnych biegów cieków wodnych (rys. 3).



Rys.

Formacje flyszowe Karpat Wschodnich, złożone z rytmicznych warstw przepuszczalnych piaskowców oraz nieprzepuszczalnych lub półprzepuszczalnych mułowców i łupków ilastych, stanowią jedno z najbardziej podatnych na erozję i osuwiska środowisk geologicznych w Europie Środkowej i Wschodniej. Połączenie stromego ukształtowania terenu, wysokich opadów atmosferycznych i kontrastów litologicznych przyczynia się do częstego występowania zarówno erozji powierzchniowej, jak i głębokich deformacji zboczy.

Erozja powierzchniowa jest szczególnie intensywna na obszarach pozbawionych lasów lub słabo porośniętych roślinnością, takich jak pastwiska i wycięte polany leśne, gdzie bezpośrednie uderzenia kropli deszczu i spływ powierzchniowy powodują przemieszczanie drobnych cząstek gleby. Erozja rowkowa i wązowa często rozwija się wzdłuż ubitych ścieżek lub dróg leśnych pozbawionych infrastruktury odwadniającej, co prowadzi do szybkiej degradacji wierzchniej warstwy gleby i zwiększonego transportu osadów w dół rzeki.

Co ważniejsze, struktura flyszowa jest podatna na niestabilność zboczy ze względu na obecność nieprzepuszczalnych warstw gliny, które po nasyceniu działają jak płaszczyzny poślizgu. Gromadzenie się wody powyżej tych warstw zwiększa ciśnienie wody porowej i zmniejsza wytrzymałość na ścinanie, co ostatecznie powoduje osuwiska translacyjne lub rotacyjne. Te ruchy masowe mają różną skalę, od płytkich osuwisk gleby po złożone, wielofazowe osuwiska, które mogą obejmować znaczne ilości podłoża skalnego i regolitów.

Osuwiska na terenach flyszowych są często reaktywowane przez długotrwałe opady deszczu, topnienie śniegu lub działania antropogeniczne, takie jak budowa dróg leśnych i zmiany w systemie odwadniania. Liczne przykłady w całym regionie – w tym w górach Poloniny, Narodowym Parku Przyrody Użanski oraz dolinie rzek Solinka i/lub San – pokazują geomorfologiczne i hydrologiczne znaczenie osuwisk zarówno jako zagrożeń, jak i elementów hydrologicznych.

## **2.5 Pokrycie terenu i użytkowanie gruntów**

Zdolność poszczególnych typów krajobrazu do infiltracji i retencji wody deszczowej zależy, oprócz wyżej wymienionych elementów lub właściwości środowiska naturalnego, również od sposobu i intensywności jego użytkowania przez człowieka. Działania związane z poszczególnymi rodzajami użytkowania krajobrazu wpływają na przykład na skład pokrywy roślinnej, charakter powierzchni krajobrazu, gęstość gleb (mechanizmy rolnicze, turystyka, wypas zwierząt gospodarskich), a tym samym na zdolność do infiltracji i zatrzymywania opadów atmosferycznych. Postanowiliśmy podzielić krajobraz ECBR zgodnie z dominującymi podstawowymi klasami pokrycia terenu na krajobraz miejski (krajobraz mieszkaniowy, infrastruktura itp.), krajobraz rolniczy (grunty orne, łąki i pastwiska, sady, winnice itp.) oraz obszary leśne.

Znaczna część krajobrazu miejskiego jest zabudowana budynkami, drogami, parkingami, placami itp. W porównaniu z naturalnymi (przyrodniczymi) zlewniami charakteryzują się one dużą powierzchnią obszarów o nieprzepuszczalnych nawierzchniach, które w znacznym stopniu wpływają na procesy ekohydrologiczne w krajobrazie osadniczym. W wyniku uszczelnienia gleby nieprzepuszczalnymi nawierzchniami infiltracja i zakłócenie naturalnych powiązań ekologicznych są ograniczone lub całkowicie zahamowane. Infiltracja opadów (zwłaszcza intensywnych) do gleby może znacznie wydłużyć czas, jaki upływa, zanim woda ta dotrze do rzek, zmniejszając w ten sposób wielkość maksymalnego przepływu i ryzyko powodzi. Oznacza to jednak, że im większy jest udział powierzchni nieprzepuszczalnych w zlewni, tym większa jest część wody deszczowej, która dociera do odbiornika w postaci bezpośredniego spływu. Prowadzi to do przyspieszenia procesu spływu, wzrostu maksymalnych natężeń przepływu i zwiększonego transportu osadów. Krajobraz osadniczy na terytorium ECBR nie stanowi dużej części

pokrycia terenu. Rozmieszczenie jest w większości chaotyczne, skupiając się głównie wokół rzek Uz, Yablunka i Rika lub ich dopływów.

Ekosystemy krajobrazowe niezalesione mają wydajność hydrologiczną w większości ukształtowaną przez człowieka. Zmniejszona zdolność poszczególnych typów krajobrazów niezalesionych do infiltracji wody deszczowej w porównaniu z drzewostanami leśnymi zależy również od mniejszego udziału próchnicy w glebie. Wraz ze wzrostem grubości warstwy próchnicy wzrasta intensywność infiltracji opadów i zmniejsza się spływ powierzchniowy. Warstwa humusu o grubości około 6 cm wystarcza, aby całkowicie wyeliminować spływ powierzchniowy (Midriak 1988).

Wielu autorów zajmowało się kwestią wpływu roślinności nieleśnej na infiltrację i retencję opadów atmosferycznych w środowisku glebowym. Ich badania dotyczyły głównie przeciwdziałania erozji przez poszczególne uprawy rolne. Wszystkie badania pokazują, że uprawiane rośliny jednoroczne chronią glebę w mniejszym stopniu niż rośliny występujące w naturalnych, stałych zbiorowiskach. Wynika to głównie z gorszej infiltracji i retencji opadów atmosferycznych oraz słabiej rozwiniętej biomasy nadziemnej i podziemnej. W związku z tym, zgodnie z pracami wyżej wymienionych autorów, można stwierdzić, że pod względem poszczególnych rodzajów pokrywy roślinnej i ich związku z wydajnością hydrologiczną aktywnej powierzchni obowiązuje następująca kolejność wydajności: las → przejściowe zarośla leśne → trwałe użytki zielone → rośliny pastewne → zboża → rośliny okopowe → pole nagie. Na obszarze ECBR ekosystemy krajobrazu nieleśnego składają się głównie z pól nienawadnianych, zarośli leśnych przejściowych oraz koszonych, a zwłaszcza wypasanych łąk.

Absolutnie dominującym elementem krajobrazu ECBR jest ekosystem leśny. Oprócz lasów produkcyjnych, lasy składają się również z pozostałości największych europejskich kompleksów lasów dziewiczych bukowych i jodłowo-bukowych (Kricsfalusy et al. 2010), a także górskich łąk, które są siedliskiem bogatej różnorodności biologicznej, w tym rzadkich i zagrożonych gatunków. Opady najpierw spadają na powierzchnię drzew, stopniowo opadając na powierzchnię roślinności niższych warstw i na powierzchnię gleby, gdzie spływają również po pniach drzew. Część opadów zatrzymana na powierzchni roślin odparowuje (przechwytywanie), reszta dociera do powierzchni gleby wraz z wodą spływającą po pniach lub spadającą przez szczeliny w koronie drzew. Na powierzchni gleby, w niewielkich zagłębieniach, woda jest częściowo zatrzymywana, w wyniku czego dochodzi do gromadzenia się wody na powierzchni, a następnie wsiąka ona w glebę lub spływa po jej powierzchni. Woda, która stopniowo wsiąka w glebę leśną, tworzy tam rezerwy wody glebowej. Ekosystemy leśne mają wyraźny wpływ na

a) ochrona odbiorców wody przed transportem i osadzaniem się osadów, b) gromadzenie i zatrzymywanie opadów, c) lokalny wpływ na zasięg i występowanie powodzi, d) wpływ na jakość wody (zmniejsza udział substancji stałych w wodzie, wpływa na skład chemiczny i poprawia czystość bakteryjną wody, e) regulacja spływu z dorzecza i zawartości wody w ciekach wodnych (przekształcanie spływu powierzchniowego w podziemny; tłumienie fal powodziowych, opóźnianie), f) wpływ lasu na powstawanie opadów poziomych (porosty powyżej 800 m n.p.m. wzbogacają ilość opadów o 250-300 mm rocznie opadami poziomymi – drzewostany iglaste nie liściaste wychwytyują najwięcej opadów poziomych) oraz g) wpływ lasu na parowanie wody (funkcja desukcyjna).

### 3. Metody

Metodologia zastosowana w niniejszym badaniu koncentruje się na analizie geoprzestrzennej procesów hydrologicznych, integrując dwa kluczowe wskaźniki: wskaźnik wilgotności topograficznej (TWI) oraz wskaźnik potencjału wodnego krajobrazu (LHP). Metody te zostały wybrane ze względu na ich zdolność do dostarczania uzupełniających informacji na temat rozmieszczenia i dynamiki wody w krajobrazie, co ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia i modelowania warunków wodnych na badanym obszarze.

W połączeniu obie te metody pozwalają na solidną analizę zmienności przestrzennej dostępności i nasycenia wodą, co ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia roli atrybutów ekosystemu w dynamice hydrologicznej oraz dla podjęcia odpowiednich działań zarządczych. W kolejnych sekcjach szczegółowo opisano konkretne źródła danych, etapy przetwarzania oraz techniki analityczne zastosowane do obliczenia i interpretacji TWI i LHP w kontekście niniejszego badania.

#### 3.1 Wskaźnik wilgotności topograficznej

Wskaźnik wilgotności topograficznej, znany również jako złożony wskaźnik topograficzny (CTI), jest wskaźnikiem wilgotności w stanie ustalonym, który określa ilościowo tendencję danego terenu do gromadzenia wody. Jest on wyprowadzany z topografii i obliczany jako:

$$TWI = \ln(\alpha/\tan\beta), \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha$  - specyficzny obszar przyczyniający się do wzrostu nachylenia na jednostkę długości konturu, a  $\tan\beta$  - lokalne nachylenie topograficzne.

Wysokie wartości TWI wskazują na obszary podatne na gromadzenie się wody, takie jak doliny i zagłębienia, natomiast niskie wartości sugerują bardziej suche, wyżej położone obszary. Wskaźnik TWI jest szeroko stosowany w modelowaniu hydrologicznym, mapowaniu wilgotności gleby i badaniach ekologicznych ze względu na jego skuteczność w przedstawianiu powiązań hydrologicznych i przestrzennego rozmieszczenia wzorców wilgotności gleby w różnych skalach (np. Beven C Kirkby, 1979; Sørensen et al., 2006). Jego zaletą jest fizyczne pochodzenie, dzięki czemu stanowi on solidny wskaźnik procesów hydrologicznych, na które ma wpływ topografia.

#### 3.2 Wskaźnik potencjału wodnego krajobrazu

Wskaźnik LHP to koncepcja praktycznego zastosowania narzędzi GIS w gospodarce wodnej. Termin „hydric” odnosi się do łącznego wpływu cech środowiskowych krajobrazu na retencję, infiltrację, akumulację, opóźnianie, regulację przepływu, jakość wody i gromadzenie się śniegu. Metoda ta pozwala opisać zdolność środowiska do spowolnienia spływu poprzez zwiększenie retencji opadów i zdolności wody do infiltracji do gruntu. Przedstawia ona skumulowany wpływ wszystkich istotnych cech środowiska na ilość, jakość, dostępność oraz przestrzenny i czasowy rozkład wody. Metodologia obliczania wskaźnika LHP została szczegółowo opisana przez Lepeška (2010), Lepeška et al. (2017), Wojkowski et al. (2019), Wałęga et al. (2020), Wojkowski et al. (2022) oraz Wojkowski et al. (2023). Wartość wskaźnika LHP można określić na podstawie następującego równania:

$$LHP = 1,5 H + 2,5 St + 3,0 Ss + 4,0 CWB + 3,0 Si + 3,5 F + 2,0 N \quad (2)$$

gdzie:

H – atrybuty warunków hydrogeologicznych, St –

atrybuty typów gleby,

Ss – atrybuty tekstury gleby,

CWB – atrybuty warunków klimatycznych, Si – atrybuty warunków geomorfologicznych,

F – atrybuty wpływu lasów na gospodarkę wodną, oraz N – atrybuty krajobrazu nieleśnego.

Potencjał wodny krajobrazu zapewnia bardziej holistyczną ocenę warunków wodnych poprzez uwzględnienie wielu czynników środowiskowych wykraczających poza samą topografię. Celem LHP jest uchwycenie ogólnej zdolności krajobrazu do zatrzymywania i dostarczania wody, odzwierciedlając wzajemne oddziaływanie czynników klimatycznych, glebowych i biologicznych, które wpływają na bilans wodny. To wielokryterialne podejście pozwala na zróżnicowane zrozumienie potencjału wodnego, uwzględniając zarówno podaż, jak i popyt na wodę w ekosystemie. Połączenie wskaźnika TWI, który podkreśla wpływ topografii na gromadzenie się wody, oraz wskaźnika LHP, który zapewnia szerszy kontekst ekologiczny i klimatyczny, stanowi kompleksowe ramy do charakteryzowania reżimu wodnego badanego obszaru i badania przestrzennych wzorców dostępności wody.

## 4. Wyniki

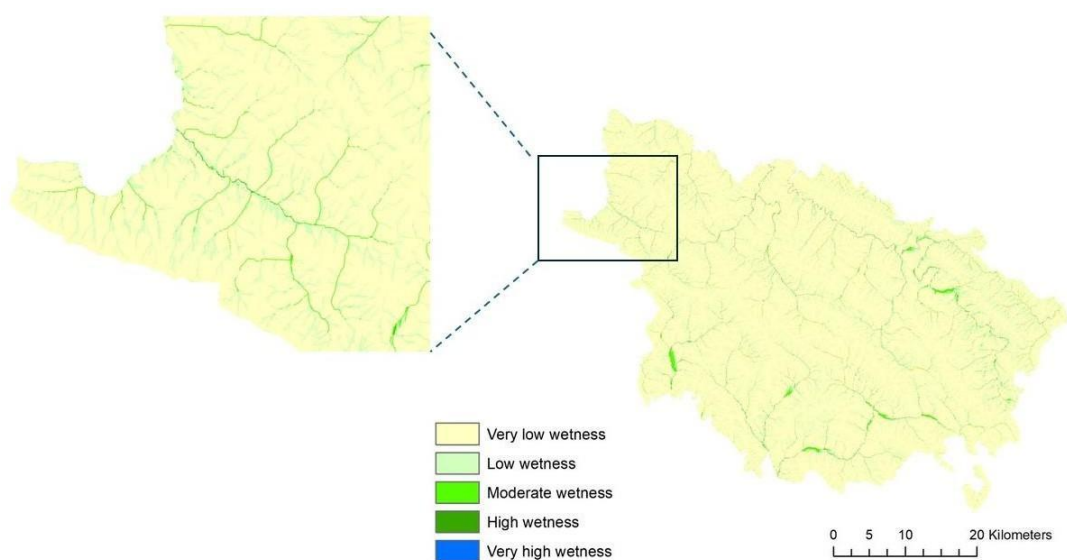
### 4.1 Wskaźnik wilgotności topograficznej

Aby ułatwić interpretację przestrzenną potencjału wilgotności powierzchniowej i zdolności retencji wody w Rezerwacie Biosfery Karpat Wschodnich, obliczono topograficzny wskaźnik wilgotności, a następnie przeklasyfikowano go do pięciu kategorii o równych odstępach. Ciągła siatka TWI, pierwotnie o zakresie od 0 do 26,25, została podzielona na pięć klas przy użyciu równych progów wynoszących około 5,25 jednostki. Podejście to umożliwia spójne porównanie położenia terenów w oparciu o ich względne właściwości hydrologiczne i potencjał gromadzenia wody. Wynikowa klasyfikacja TWI jest następująca:

Tab.1 Klasyfikacja TWI ECBR

Klasa	Zakres TWI	Opis	Interpretacja hydrologiczna
1	0,00 – 5,25	Bardzo niska wilgotność	Wypukłe formy terenu, grzbiety, strome górne zbocza
2	5,25 – 10,50	Niska wilgotność	Dobrze odwodnione zbocza z ograniczonym gromadzeniem się śniegu
3	10,50 – 15,75	Umiarkowana wilgotność	Środkowe zbocza, strefy przejściowe
4	15,75 – 21,00	Wysoka wilgotność	Niższe zbocza, podnóża zboczy, płytkie zagłębienia
5	21,00 – 26,25	Bardzo wysoka wilgotność	Dna dolin, zagłębienia, potencjalne tereny podmokłe

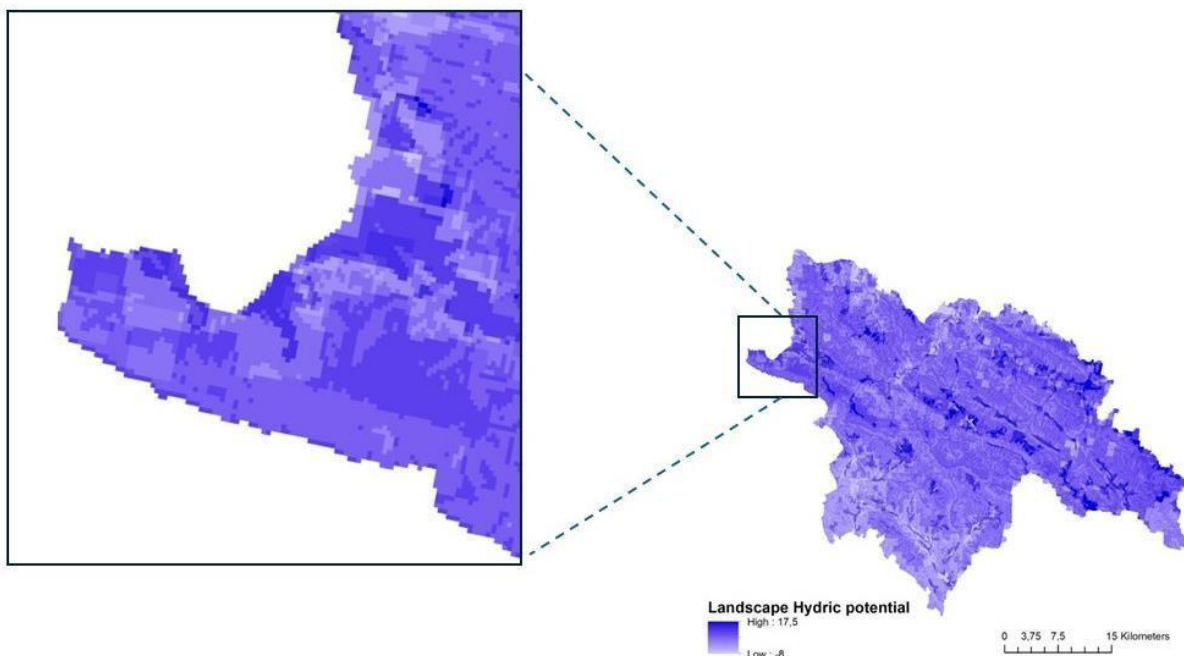
Klasyfikacja ta podkreśla obszary o zwiększonym potencjale retencji wody, nasycenia powierzchniowego i konwergencji przepływu podpowierzchniowego. Wyższe wartości TWI (klasy 4 i 5) są zazwyczaj związane z obszarami o mniejszym nachyleniu zbocza i większym obszarem dopływowym, co wskazuje na obszary odpowiednie do stosowania środków ochrony hydrologicznej, renaturyzacji terenów podmokłych i planowania zagospodarowania terenu opartego na retencji. Natomiast niższe wartości TWI (klasy 1 i 2) reprezentują obszary o stromych zboczach i minimalnym dopływie z wyższych partii, które są zazwyczaj dobrze odwodnione i mniej podatne na gromadzenie się wody. Strefy te mogą być bardziej podatne na spływ powierzchniowy i erozję, zwłaszcza na podłożu flišowym, powszechnym w tym regionie. Klasyfikacja TWI stanowi kluczowy wkład w identyfikację przestrzennych wzorców hydrologicznych oraz wytyczanie strategii zagospodarowania terenu i zarządzania opartego na ekosystemach zarówno w zalesionych, jak i niezalesionych podregionach Rezerwatu Biosfery Karpat Wschodnich.



Zmodyfikowany wskaźnik wilgotności topograficznej wykazał silną przewagę terenów suchych i umiarkowanie suchych na badanym obszarze. Kategoria 1 (bardzo niski wskaźnik TWI), obejmująca strome zbocza i wypukłe tereny o minimalnym potencjale akumulacji, zajmuje powierzchnię około 1850,88 km<sup>2</sup>, co stanowi 88,6% całkowitej powierzchni. Kategoria 2, interpretowana jako zbocza o umiarkowanym drenażu, stanowi 9,9% powierzchni. Kategorie 3 i 4, które odpowiadają terenom coraz bardziej zbieżnym o umiarkowanym lub wysokim potencjale wilgotności, stanowią łącznie tylko 1,55%. Najwyższa klasa wilgotności (kategoria 5), często kojarzona z dnem dolin lub zagłębieniami, zajmuje znikomą część krajobrazu (0,03 km<sup>2</sup>, czyli 0,002%), co prawdopodobnie odzwierciedla strukturę geomorfologiczną i geologiczną krajobrazu flyszowego Karpat, gdzie szerokie strefy nasycone wodą są rzadkością.

#### 4.2 Wskaźnik potencjału wodnego krajobrazu

Różnorodność przestrzenna wskaźnika LHP w Europie została przedstawiona na rys. 5. Ze względu na nierównomierny rozkład danych otwartych i znormalizowanych przedstawiamy rozmieszczenie przestrzenne wskaźnika LHP tylko dla części ECBR.



Rys. 5 Rozkład przestrzenny wskaźnika potencjału wodnego krajobrazu w polskiej i słowackiej części ECBR

Wskaźnik LHP zapewnia kompleksową ocenę przestrzenną zdolności ekosystemów lądowych do zatrzymywania, magazynowania i powolnego uwalniania opadów. Służy on jako złożony wskaźnik odzwierciedlający interakcje między topografią, pokryciem terenu, właściwościami gleby i procesami spływu spowodowanymi nachyleniem terenu. W obrębie Rezerwatu Biosfery Karpat Wschodnich – regionu charakteryzującego się dynamiczną orografią, geologią zdominowaną przez flysch oraz mozaiką krajobrazów leśnych i rolniczych – LHP dostarcza cennych informacji na temat przestrzennej heterogeniczności retencji wody i dynamiki spływu.

**Kategoria 1** obejmuje obszary o *doskonałym potencjale wodnym* ( $LHP \geq 20,0$ ). Znajdują się one zazwyczaj w zagłębieniach topograficznych, na dnach dolin, obszarach płaskich lub w strefach koluwalnych, gdzie woda gromadzi się naturalnie dzięki zbieżnym warunkom przepływu i minimalnym nachyleniom terenu. Takie

Jednostki terenowe często posiadają gleby hydromorficzne lub warstwy bogate w substancje organiczne o wysokiej porowatości i zdolności zatrzymywania wody. Dominującym procesem hydrologicznym jest tutaj akumulacja, prowadząca do zmniejszenia spływu powierzchniowego i zwiększenia infiltracji. Tereny te często stanowią siedliska dla mokradeł, stref nadbrzeżnych lub łąk wilgotnych i odgrywają kluczową rolę ekologiczną w regulowaniu lokalnego mikroklimatu, łagodzeniu skutków powodzi i zapewnianiu ciągłości siedlisk. Z punktu widzenia zarządzania strefy te powinny być traktowane priorytetowo w zakresie ochrony i renaturyzacji. Modyfikacje antropogeniczne, takie jak drenaż lub przekształcenie gruntów, mogą znacząco naruszyć ich integralność hydrologiczną i ekologiczną. Obszary należące do tej kategorii LHP są raczej rzadkie, rozmieszczone stochastycznie i stanowią jedynie nieznaczny odsetek całkowitej powierzchni ECBR. Ich znaczenie ma głównie charakter lokalny.

**Kategoria 2**, sklasyfikowana jako obszar o *wysokim potencjale wodnym* (LHP między 10,0 a 19,9), obejmuje tereny o korzystnych właściwościach retencyjnych, choć w mniejszym stopniu niż kategoria 1. Obszary te często znajdują się na wklęsłych niższych zboczach wzgórz, płytkich basenach lub zalesionych płaskowyżach. Zazwyczaj charakteryzują się one dobrze ukształtowanymi, stosunkowo przepuszczalnymi glebami i roślinnością, która ułatwia zarówno przechwytywanie, jak i infiltrację wody. Chociaż są one mniej podatne na nasycenie/retencję wody niż kategoria 1, nadal wykazują zmniejszony spływ powierzchniowy i mogą pełnić funkcję stref buforowych w sieci hydrologicznej. Odgrywają one znaczącą rolę w utrzymaniu przepływu podstawowego i regulacji wilgotności gleby. Pod względem planowania użytkowania gruntów nadają się one dobrze do leśnictwa o niskiej intensywności, tradycyjnych systemów agroleśnych lub zarządzanych użytków zielonych z praktykami ochrony struktury gleby. W polskiej i słowackiej części ECBR kategoria ta zajmuje powierzchnię 245,64 km<sup>2</sup>.

**Kategoria 3**, odpowiadająca *średniemu potencjałowi wodnemu* (LHP między 0,1 a 9,9), oznacza obszary, na których zachowania hydrologiczne są stosunkowo zrównoważone, bez dominującej retencji ani nadmiernego spływu. Strefy te często znajdują się na umiarkowanych zboczach o zmiennej głębokości gleby i zróżnicowanym pokryciu terenu. Wykazują one zachowania przejściowe, gdzie funkcjonowanie hydrologiczne jest wrażliwe na gospodarkę gruntami i zmiany sezonowe. Pod naturalną pokrywą roślinności obszary te mogą sprzyjać sporadycznej infiltracji i opóźnionemu spływowi. Jednak w przypadku zmienionego użytkowania gruntów lub zdegradowanej pokrywy roślinnej mogą one przechodzić w kierunku bardziej erozyjnych reakcji. Dlatego też zrównoważone gospodarowanie gruntami w tych strefach – takie jak uprawa konserwująca, pasy buforowe porośnięte roślinnością lub wypas rotacyjny – ma zasadnicze znaczenie dla utrzymania ich funkcji wodnej i zapobiegania degradacji. Obszary o średnim potencjale wodnym zajmują powierzchnię 1206,08 km<sup>2</sup> w polskiej i słowackiej części ECBR.

**Kategoria 4**, reprezentująca *ograniczony potencjał wodny* (LHP między -10,0 a 0,0), obejmuje jednostki terenowe, w których retencja wody jest znacznie ograniczona przez stromość terenu, płytkość i zagęszczenie gleby, zmniejszoną pokrywą roślinną i/lub nieprzepuszczalne (sztuczne) powierzchnie. Pod względem hydrologicznym funkcjonują one głównie jako obszary generujące spływ, zwłaszcza podczas intensywnych opadów. Ograniczona infiltracja i wysokie wskaźniki spływu zwiększają ryzyko erozji powierzchniowej, tworzenia się rowków i transportu osadów w dół zbocza. Z geomorfologicznego punktu widzenia strefy te w nieproporcjonalny sposób przyczyniają się do powstawania osadów w zlewni. Wykorzystanie gruntów na takich obszarach powinno być zatem zarządzane z ostrożnością, z uwzględnieniem strategii ograniczania erozji, kontrolowanego wypasu i wzmocnienia roślinności. Na badanym terytorium obszary o ograniczonym potencjale wodnym znajdują się głównie w środowiskach zurbanizowanych i stanowią część sieci dróg leśnych. Chociaż ich powierzchnia w obrębie ECBR wynosi 30,82 km<sup>2</sup> mogą one odpowiadać za niekorzystne skutki procesu spływu w skali lokalnej i regionalnej ze względu na ich wpływ na zmniejszenie zdolności infiltracji gleby, co prowadzi do zwiększonego spływu powierzchniowego i zmiany przebiegu strumieni. Drogi leśne często pełnią funkcję sztucznych korytarzy drenażowych, szybko zbierając i przekierowując opady atmosferyczne oraz wodę ze zboczy, zakłócając w ten sposób naturalną łączność hydrologiczną.

**Kategoria 5**, oznaczająca *znacznie ograniczony potencjał wodny* ( $LHP \leq -10,1$ ), obejmuje środowiska o najbardziej niekorzystnych warunkach hydrologicznych w danym krajobrazie. Należą do nich strome, wypukłe zbocza, tereny zdegradowane oraz obszary o zbitych glebach lub nieprzepuszczalnych (sztucznych) powierzchniach, gdzie infiltracja jest minimalna, a dominuje spływ powierzchniowy. Ukształtowanie geomorfologiczne tych stref predysponuje je do przyspieszonych procesów erozji, w tym erozji powierzchniowej, erozji wąwozowej, a w niektórych przypadkach płytkich osuwisk. Ich wpływ na szczyty powodziowe i ładunki osadów w dolnym biegu rzek jest znaczący. Obszary te często pokrywają się z terenami naruszonymi lub intensywnie użytkowanymi i wymagają ukierunkowanych interwencji, takich jak zalesianie, tarasowanie, stabilizacja zboczy lub wyłączenie z intensywnego użytkowania gruntów. Długoterminowe strategie dla tych stref powinny mieć na celu ograniczenie spływu powierzchniowego i poprawę interakcji między glebą a wodą poprzez rozwiązania oparte na naturze. Obszary należące do tej kategorii LHP są raczej rzadkie, rozmieszczone stochastycznie i stanowią jedynie nieznaczną część całkowitej powierzchni ECBR.

## 5. Od danych do decyzji: w kierunku lepszego zarządzania krajobrazem

Rozmieszczenie przestrzenne potencjału wodnego krajobrazu (LHP) odzwierciedla złożoną interakcję czynników środowiskowych, w tym opadów, ewapotranspiracji, warunków geomorfologicznych, właściwości gleby, cech hydrogeologicznych podłoża skalnego i pokrycia terenu. Czynniki te mają decydujący wpływ na funkcjonowanie ekosystemów pod względem wodnym. Różne poziomy LHP wpływają na rodzaj i intensywność środków zarządzania krajobrazem, które należy zastosować. Zmienność ta zależy od kontekstu i jest kształtowana zarówno przez czynniki stałe (np. skład podłoża skalnego), jak i zmienne dynamiczne (np. sezonowe lub przestrzenne wahania nasycenia gleby) w obrębie określonych zlewni rzek. Heterogeniczność przestrzennego rozmieszczenia i jakości LHP podkreśla znaczący wpływ pokrycia terenu i użytkowania gruntów – szczególnie pod względem rodzaju i intensywności – na funkcjonowanie hydrologiczne ekosystemów w rezerwacie biosfery Karpat Wschodnich. Spośród wszystkich atrybutów ekosystemu użytkowanie gruntów stanowi najbardziej bezpośrednią interwencję człowieka, a zatem ma decydujący wpływ na LHP. Liczne badania wykazały, że zmiany w użytkowaniu gruntów i pokryciu terenu mogą znacznie zmniejszyć szczyty powodziowe w zlewniach (Viola et al., 2014), zwłaszcza na obszarach, gdzie szybko powstaje spływ powierzchniowy (Naef et al., 2002). W związku z tym zarządzający zasobami wodnymi i dorzeciami rzek, a także decydenci powinni skupić się na poprawie zdolności ekosystemów do zatrzymywania i infiltracji opadów. Kluczowe priorytety powinny obejmować optymalizację struktury użytkowania gruntów, zrównoważone zarządzanie zasobami naturalnymi, regulację istniejącej i planowanej działalności człowieka oraz promowanie odnawiania i renaturalizacji krajobrazu i korytarzy rzecznych.

W obszarach leśnych systemy gospodarki leśnej powinny zostać przeklasyfikowane z grup ukierunkowanych na produkcję do kategorii pełniących przede wszystkim funkcje regulacji wodnej lub ochrony gleby (Lepeška, 2013). Na obszarach, na których zalecane jest pozyskiwanie drewna, należy przyjąć ostrożne podejście – zwłaszcza w zakresie pozyskiwania, transportu i składowania drewna (Midriak i in. 1988). W procesie odnowy drzewostanu należy preferować gatunki rodzime, przystosowane do danego stanowiska. Naturalne zaburzenia powodują heterogeniczność w lasach, które w przeciwnym razie byłyby jednolite, przyczyniając się do różnorodności wiekowej, gatunkowej i strukturalnej, co ostatecznie zwiększa stabilność ekologiczną (Holling, 1992; Spies, 1997), dlatego też interwencje antropogeniczne na takich obszarach powinny być ograniczone do minimum lub całkowicie wyeliminowane. Kluczowe znaczenie ma unikanie tworzenia gęstych sieci dróg leśnych, które zwiększają spływ powierzchniowy i fragmentację (Wemple C Jones, 2003). Ochrona różnorodności biologicznej ma kluczowe znaczenie dla wspierania funkcjonalności ekosystemów, zwłaszcza usług regulacyjnych (Balvanera i in., 2006). W tym kontekście zaleca się zachowanie większej ilości gruboziarnistych szczątków drzewnych (CWD), które zwiększają chropowatość powierzchni, spowalniają spływ powierzchniowy (Bilby C Bisson, 1998) i wydłużają czas infiltracji. CWD poprawia wydajność hydrologiczną ekosystemów leśnych, łagodzi ekstremalne warunki mikroklimatyczne, służy jako ważny zbiornik wody w okresach suszy (Harmon et al., 1986) i chroni funkcje produkcyjne gleby (Brown et al., 2007). Jednak badania pokazują, że lasy europejskie nadal mają niewystarczający poziom szczątków drzewnych (Christensen et al., 2005).

Znaczna część obszaru niepokrytego lasami w EBCR składa się z gruntów ornych, często ułożonych w drobną mozaikę pól. Dowody pochodzące z różnych zlewni rolniczych potwierdzają, że ulepszone praktyki uprawy roślin i orki zwiększają przepływ podstawowy (Price, 2011). Stosowanie upraw okrywowych poza sezonem i uprawa konserwująca znacznie zmniejszają spływ powierzchniowy (Evrard et al., 2010). Pasma buforowe z trawy utworzone wzdłuż granic pól poprawia ponowne wsiąkanie wody i zmniejsza straty netto gleby (Ali C Reineking, 2016). Połączenie ulepszonych praktyk uprawowych i technik konserwacyjnych może znacznie zmniejszyć szczytowe przepływy i ładunki osadów (Evrard et al., 2010). Dlatego zaleca się ponowną ocenę płodozmianu i włączenie gatunków wzbogacających materię organiczną gleby (np. koniczyna czerwona, lucerna; Charman C Murphy, 1998) oraz wdrożenie

techniki ochrony (Montgomery, 2007). Środki te przyczyniają się do długoterminowego zdrowia gleby, zwiększają potencjał retencyjny krajobrazu i wspierają zrównoważoną gospodarkę wodną w skali zlewni.

### **Zalecenia dotyczące zarządzania oparte na klasyfikacji LHP w rezerwacie biosfery Karpat Wschodnich**

Klasyfikacja krajobrazu do kategorii oparta na LHP stanowi solidne ramy dla opracowywania strategii zarządzania o wyraźnym wymiarze przestrzennym. W kontekście Rezerwatu Biosfery Karpat Wschodnich – regionu wrażliwego ekologicznie i dynamicznego pod względem hydrologicznym – dostosowane do potrzeb zalecenia dla każdej kategorii LHP mogą wspierać retencję wody, zapobiegać degradacji gleby i zwiększać odporność na zmiany klimatu. W poniższej sekcji przedstawiono szczegółowe podejścia do zarządzania dla każdej klasy LHP, zarówno w odniesieniu do terenów zalesionych, jak i niezalesionych.

#### **Kategoria 1 – Doskonały potencjał wodny (LHP $\geq$ 20,0)**

Obszary o doskonałym potencjale wodnym są strategicznymi strefami akumulacji hydrologicznej i świadczenia usług ekosystemowych. Często obejmują one tereny podmokłe, łąki nadbrzeżne, torfowiska i doliny aluwialne o nasyconych glebach, wysokiej zawartości materii organicznej i częstych interakcjach z wodami gruntowymi. Zarządzanie w tych strefach powinno kłaść nacisk na ścisłą ochronę i ekologiczne zabezpieczenie istniejących terenów podmokłych i stref nadbrzeżnych oraz na odbudowę ekologiczną w miejscach, gdzie doszło do zakłóceń. Należy zminimalizować wszelkie interwencje antropogeniczne.

#### **Kategoria 2 – Wysoki potencjał wodny (LHP 10,0–1G.G)**

Tereny tej klasy stanowią kluczowe strefy buforowe, które regulują retencję wody i spowalniają spływ wody z obszarów położonych wyżej. Charakteryzują się umiarkowanym nachyleniem i wysoką zdolnością infiltracji, co sprzyja stabilności wilgotności gleby. Zarządzanie powinno koncentrować się na wzmacnianiu naturalnych procesów infiltracji i retencji. Na obszarach leśnych zaleca się stosowanie zrównoważonych praktyk leśnych, takich jak selektywne przerzedzanie, pozostawianie martwego drewna i wycinka drzew z minimalnym wpływem na glebę. Utrzymanie ciągłej pokrywy leśnej o wysokim stopniu przechwytywania wody przez korony drzew przyczynia się do długoterminowej stabilności hydrologicznej. Ogólnie rzecz biorąc, głównymi założeniami w ekosystemach leśnych powinno być zachowanie starych lasów, zwłaszcza lasów pierwotnych i naturalnych lasów bukowych, odtworzenie lasów poprzez naturalną sukcesję lub sadzenie drzewostanów mieszanych, zakaz/ograniczenie wycinki na zboczach o wysokim wskaźniku TWI i/lub niskim wskaźniku LHP. Obecne działania powinny obejmować rewizję dróg leśnych i mostów, wsparcie dla gospodarki leśnej zbliżonej do naturalnej (FSC). W krajobrazach niezalesionych lub kulturowych optymalne są tradycyjne systemy agroleśnictwa (jeśli występują), rotacyjne użytkowanie pastwisk i trwałe użytki zielone z roślinnością o głębokich korzeniach. Należy unikać zagęszczania gleby poprzez kontrolę wypasu i regulowany dostęp. Środki renaturyzacyjne mogą obejmować przywrócenie buforowych stref roślinnych i praktyk agroekologicznych opartych na konturach. Strefy te mogą w przyszłości służyć również jako cele dla systemów płatności za usługi ekosystemowe skoncentrowanych na zarządzaniu zlewniami.

#### **Kategoria 3 – Średni potencjał wodny (LHP 0,1–G.G)**

Obszary sklasyfikowane jako posiadające średni potencjał wodny stanowią przejściowe strefy krajobrazowe, które charakteryzują się umiarkowanymi zrównoważonymi właściwościami infiltracji i spływu. Obszary te są zazwyczaj położone na łagodnie pofałdowanym terenie lub w połowie zbocza, gdzie głębokość, tekstura i struktura gleby zapewniają częściową zdolność retencji wody, ale pozostają wrażliwe na zakłócenia antropogeniczne. Chociaż strefy te nie zawsze są bardzo podatne na szybki spływ lub erozję, ich równowaga hydrologiczna może ulec znaczącej zmianie w odpowiedzi na ekstremalne opady, nieodpowiednie

zagospodarowanie terenu, zagęszczenie gleby lub utrata roślinności. Na obszarach leśnych należy położyć nacisk na utrzymanie struktury lasu i integralności korony drzew. Aby zachować ochronę gleby przy jednoczesnym zapewnieniu produktywności lasu, zaleca się selektywne przerzedzanie drzewostanu zamiast wycinki. Zachęca się do zatrzymywania gruboziarnistych szczątków drzewnych ze względu na ich pozytywny wpływ na chropowatość powierzchni, czas infiltracji i regulację mikroklimatu gleby. W procesie odnowy lasów należy priorytetowo traktować gatunki rodzime, przystosowane do danego stanowiska, a podczas prac mechanicznych należy unikać okresów wysokiej wilgotności gleby, aby zapobiec jej zagęszczeniu. Na obszarach rolniczych i użytków zielonych zaleca się stosowanie upraw konserwujących, upraw okrywowych i systemów wypasu rotacyjnego w celu ograniczenia spływu powierzchniowego i poprawy retencji wody w glebie. Pasma buforowe, trawiaste drogi wodne i roślinne obrzeża pól odgrywają kluczową rolę w przechwytywaniu spływu powierzchniowego i promowaniu infiltracji. Należy preferować uprawy głęboko zakorzenione i gatunki strączkowe, które poprawiają zawartość materii organicznej w glebie, a także praktyki minimalizujące ekspozycję gołej gleby, zwłaszcza w okresach intensywnych opadów. W skali krajobrazu wprowadzenie mozaiki heterogenicznego użytkowania gruntów, takiej jak elementy agroleśnictwa, może wzmocnić odporność ekologiczną. Wdrożenie upraw konturowych, rowy roślinne i małe struktury retencyjne (np. rowy infiltracyjne lub zapory kontrolne) mogą dodatkowo złagodzić gromadzenie się przepływu i zmniejszyć szczytowe natężenie przepływu.

#### **Kategoria 4 – Ograniczony potencjał wodny (LHP -10,0 do 0,0)**

Strefy o ograniczonym potencjale wodnym charakteryzują się ograniczoną zdolnością retencji wody, wynikającą zazwyczaj z połączenia stromych zboczy, płytkich i szkieletowych gleb oraz nieprzepuszczalnych powierzchni lub podłoża skalnego (formacje flyschowe). Obszary te wykazują szybką reakcję hydrologiczną na opady atmosferyczne, charakteryzują się wysokim spływem powierzchniowym, minimalną infiltracją oraz podwyższoną podatnością na erozję gleby i ruchy masowe. Ich rola w przyczynianiu się do powstawania szczytowych przepływów w zlewni i transportu osadów sprawia, że są one kluczowymi obszarami dla działań związanych z kontrolą erozji i stabilizacją zboczy.

Na terenach zalesionych zarządzanie musi koncentrować się na zachowaniu ciągłej pokrywy roślinnej, aby zapewnić spójność korzeni i stabilność zboczy. Działania związane z gospodarką leśną powinny być bardzo ograniczone, a w przypadkach, gdy są nieuniknione, prowadzone wyłącznie w miesiącach zimowych przy użyciu technik pozyskiwania drewna o niewielkim wpływie na środowisko. Należy wspierać naturalną regenerację, ale w miejscach zdegradowanych lub niestabilnych konieczne może być wspomagane zalesianie gatunkami odpornymi na stres, dostosowanymi do konkretnego stanowiska. Interwencje leśne muszą również mieć na celu minimalizację zakłóceń w runie leśnym, szczególnie w przypadku płytkich gleb podatnych na osuwanie się. W strefach niezalesionych lub zdegradowanych niezbędne jest wprowadzenie ścisłych regulacji dotyczących użytkowania gruntów. Intensywna uprawa rolna jest generalnie odradzana ze względu na wysokie ryzyko erozji, natomiast ekstensywny wypas może być warunkowo dozwolony tylko w połączeniu z technikami rolniczymi zapobiegającymi erozji. Rekultywacja tych obszarów powinna obejmować ponowne zalesianie, hydroobsiewanie trawami o głębokich korzeniach oraz, w razie potrzeby, stosowanie stabilizacji geotekstylnej w celu zapobiegania odrywaniu się powierzchni i powstawaniu wąwozów. Ponadto należy bezwzględnie unikać rozwoju infrastruktury i intensywnej działalności rekreacyjnej w tych strefach ze względu na niestabilność zboczy i ograniczoną zdolność retencyjną. Zarządcy gruntów i planiści powinni priorytetowo traktować naturalną rekultywację, zabezpieczenie przed erozją i ochronę istniejącej roślinności w takich strefach, aby zmniejszyć wpływ na tereny położone w dolnym biegu rzeki i zachować funkcjonalność hydrologiczną w skali zlewni.

#### **Kategoria 5 – Znacznie ograniczony potencjał wodny (LHP ≤ -10,1)**

Kategoria ta obejmuje strefy najbardziej niekorzystne pod względem hydrologicznym i niebezpieczne pod względem geomorfologicznym. Bardzo strome zbocza, słaba struktura gleby i minimalna infiltracja prowadzą do wysokiego ryzyka spływu powierzchniowego i erozji, często objawiającego się erozją powierzchniową, tworzeniem się wąwozów lub płytkimi osuwiskami. Takie warunki są powszechne na wypukłych grzbietach, zboczach pozbawionych lasów lub w strefach naruszanych przez działalność człowieka. Obszary te wymagają pilnych działań naprawczych i ścisłego wykluczenia z intensywnego użytkowania.

W przypadku terenów zalesionych renaturyzacja powinna obejmować zalesianie gatunkami o głębokim systemie korzeniowym, stabilizującymi glebę, stosowanie biologicznych metod kontroli erozji oraz stabilizację inżynieryjną (np. faszyny, ściany kratowe) tam, gdzie jest to konieczne. W przypadku aktywnego osuwania się zboczy przed podjęciem jakichkolwiek działań konieczna jest ocena geotechniczna.

W otwartych krajobrazach fundamentalne znaczenie ma zmiana ukształtowania zboczy, ponowne zalesianie i kontrolowane wykluczenie zwierząt gospodarskich. Uprawa i budowa muszą być surowo zabronione. Strefy te najlepiej włączyć do planów ochrony całego zlewni i uznać za „bezinterwencyjne”. Skuteczne zarządzanie terenami charakteryzującymi się niskim lub ograniczonym potencjałem wodnym – zwłaszcza tymi z kategorii 4 i 5 – wymaga zróżnicowanego, interdyscyplinarnego podejścia, które uwzględni czynniki geologiczne, ekologiczne i społeczno-ekonomiczne. Wszystkie interwencje na tych wrażliwych obszarach powinny opierać się na kilku nadrzędnych zasadach.

Przed wszystkim każda znacząca zmiana użytkowania gruntów lub interwencja inżynieryjna w tych strefach powinna być poprzedzona kompleksową oceną geotechniczną. Powszechna obecność podłoża skalnego typu flysz, charakteryzującego się warstwowością i zmienną przepuszczalnością, wymaga szczegółowego zrozumienia stabilności podłoża, przewodności hydrologicznej i podatności na osuwiska. Takie oceny stanowią podstawę do podejmowania świadomych decyzji dotyczących stabilizacji zboczy, budowy i planowania roślinności.

### **Kwestie przekrojowe dotyczące zrównoważonego zarządzania krajobrazem w strefach o niskiej retencji**

Równie ważna jest ochrona jakości wody. Strome zbocza i gleby podatne na erozję na terenach zdominowanych przez flysz przyczyniają się do zwiększonego transportu osadów i zanieczyszczeń w systemach wodnych położonych w dolnym biegu rzek. Dlatego wszystkie działania związane z zarządzaniem – czy to ponowne zalesianie, kontrola erozji, czy regulacja użytkowania gruntów – muszą być zaprojektowane z wyraźnym celem poprawy lub utrzymania jakości wody poprzez zwiększenie infiltracji i zminimalizowanie spływu powierzchniowego. Wykorzystanie rodzimych, lokalnie przystosowanych gatunków roślin ma kluczowe znaczenie we wszystkich działaniach związanych z ponownym zalesianiem. Gatunki te są z natury lepiej przystosowane do lokalnych warunków glebowych, hydrologicznych i klimatycznych, wykazują większą odporność na suszę i szkodniki oraz przyczyniają się do zachowania regionalnej różnorodności biologicznej. Ich włączenie wzmacnia odporność ekologiczną i poprawia długoterminowe wyniki renaturyzacji. Często pomijamy, ale istotnym elementem zrównoważonego zarządzania jest zaangażowanie społeczności. Zaangażowanie lokalnych interesariuszy w planowanie, projektowanie i wdrażanie działań związanych z krajobrazem sprzyja poczuciu odpowiedzialności, zapewnia dostosowanie do lokalnej wiedzy i potrzeb oraz zwiększa długoterminową skuteczność i utrzymanie. Podejście partycypacyjne może wypełnić lukę między zaleceniami naukowymi a praktycznym, dostosowanym do uwarunkowań kulturowych wdrożeniem.

Ponadto odporność na zmiany klimatu musi być głównym kryterium przy opracowywaniu wszystkich strategii. Przewidywane zmiany w reżimach opadów – w tym częstsze intensywne opady deszczu i przedłużające się okresy suszy – stanowią poważne zagrożenie dla obszarów wrażliwych pod względem hydrologicznym. Działania powinny zatem mieć na celu poprawę retencji wilgoci w glebie, zmniejszenie szczytowych wartości spływu powierzchniowego oraz zwiększenie zdolności buforowej roślinności, budując w ten sposób zdolność adaptacyjną zarówno w skali lokalnej, jak i zlewni. Wreszcie, niezbędne jest przyjęcie holistycznego, zintegrowanego podejścia do zarządzania krajobrazem. Granice między kategoriami LHP nie są absolutne, a procesy hydrologiczne funkcjonują w różnych skalach przestrzennych. Działania zarządcze w jednej strefie nieuchronnie wpływają na obszary sąsiednie lub położone w dolnym biegu rzeki. W związku z tym interwencje powinny być opracowywane i wdrażane w ramach struktury obejmującej cały krajobraz, w sposób skoordynowany równoważący funkcje ekologiczne, regulację gospodarki wodnej i wymagania związane z użytkowaniem gruntów.

Chociaż zwiększanie retencji wody w ekosystemach jest powszechnie uznawane za kluczową strategię łagodzenia ekstremalnych zjawisk hydrologicznych i poprawy odporności krajobrazu, należy pamiętać o ograniczeniach takich działań w obszarach wrażliwych pod względem geomorfologicznym. W szczególności obszary podatne na osunięcia ziemi, niestabilność zboczy i płytkie profile glebowe – często związane z formacjami flyszowymi lub innymi strukturalnie słabymi podłożami skalnymi – stanowią poważne zagrożenie w przypadku długotrwałego lub nadmiernego nawilżenia gleby. Celowe działania mające na celu zatrzymywanie wody lub zwiększanie infiltracji w tych regionach mogą nieumyślnie podnieść poziom wód gruntowych lub zwiększyć nasycenie gleby, zmniejszając w ten sposób wytrzymałość na ścinanie i zwiększając ryzyko wystąpienia zjawisk masowych przemieszczeń, w tym spływów gruzowych, osuwisk i uszkodzeń rotacyjnych. W takich kontekstach krytycznymi czynnikami ograniczającymi stają się abiotyczne elementy ekosystemu, zwłaszcza stabilność podłoża, dynamika ciśnienia wody porowej i hydrologia zboczy. Chroniczny lub ostry wzrost dostępności wilgoci może prowadzić do nieodwracalnych zmian geomorfologicznych, w tym rozpadu struktury gleby, zamierania roślinności z powodu niedotlenienia korzeni oraz trwałej utraty funkcji produkcyjnych lub ochronnych gruntów. Dlatego strategie retencji wody w skali krajobrazu muszą być starannie dostosowane do lokalnych warunków geotechnicznych i hydrologicznych, a w strefach wysokiego ryzyka wszelkie interwencje powinny być podejmowane zgodnie z zasadą ostrożności.

## Wnioski

Ocena wskaźnika potencjału wodnego krajobrazu, poparta wskaźnikiem wilgotności topograficznej, ujawnia wyraźne przestrzenne wzorce zdolności retencji wody w całym rezerwacie biosfery Karpat Wschodnich. Wzorce te są kształtowane przez wzajemne oddziaływanie czynników abiotycznych i biotycznych, w szczególności morfologii terenu, głębokości i tekstury gleby, rodzajów pokrycia terenu oraz przepuszczalności podłoża skalnego. Połączenie wskaźników TWI i LHP umożliwia nie tylko identyfikację obszarów o największej retencji wody, ale także wyznaczenie obszarów, w których funkcja hydrologiczna jest ograniczona lub poważnie utrudniona.

Badanie potwierdza, że retencja wody oparta na ekosystemie jest najskuteczniejsza na obszarach o umiarkowanym lub wysokim wskaźniku LHP, gdzie topografia, zdolność infiltracji gleby i struktura roślinności sprzyjają stopniowemu spływowi, magazynowaniu wody w glebie i utrzymaniu przepływu podstawowego. Na takich obszarach rozwiązania oparte na naturze, takie jak ponowne zalesianie, renaturyzacja terenów podmokłych, uprawa konturowa i zielona infrastruktura, mogą znacznie poprawić retencję wody i zmniejszyć ryzyko powodzi.

Kluczowe zalecenia obejmują:

- Podział na strefy użytkowania gruntów w oparciu o LHP: Kierowanie planowaniem leśnictwa, rolnictwa i infrastruktury zgodnie z możliwościami retencyjnymi.
- Gospodarka leśna dostosowana do funkcji hydrologicznej: utrzymanie pokrywy koron drzew, zmniejszenie gęstości dróg i zachowanie grubych szczątków drzewnych w lasach o dużym nachyleniu.
- Zrównoważone praktyki rolnicze: promowanie upraw okrywowych, uprawy konserwującej i pasów buforowych na obszarach o umiarkowanym LHP w celu zwiększenia infiltracji i zawartości materii organicznej w glebie.
- Zintegrowane planowanie w skali zlewni: uznanie, że interwencje w strefach o wysokim LHP mogą zmniejszyć szczytowe przepływy w dolnym biegu rzeki i transport osadów.
- Odporność na zmiany klimatu: zapewnienie, że działania związane z zarządzaniem uwzględniają prognozowane zmiany w reżimach opadów i zdarzeniach ekstremalnych.

## Referencje

- Ali, H. E., Reineking, B. 2016. Ekstensywne zarządzanie obrzeżami pól zwiększa ich potencjał w zakresie ograniczania erozji gleby poza terenem uprawnym. *Journal of environmental management*, 1cS, 202-209.
- Balvanera, P., Pfisterer, A. B., Buchmann, N., He, J. S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., C Schmid, B. 2006. Kwantyfikacja dowodów wpływu różnorodności biologicznej na funkcjonowanie ekosystemów i usługi ekosystemowe. *Ecology letters*, S(10), 1146-1156.
- Berhanu, B., Melesse, A.M., Seleshi, Y., 2013. Strefy hydrologiczne oparte na systemie GIS i geobaza danych gleby Etiopii. *Catena* 104, 21-31.
- Beven, K. J., C Kirkby, M. J. 1979. Model hydrologii zlewni oparty na fizycznych zmiennych obszarów zasilających. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), 2015. IHME1500: Międzynarodowa mapa hydrogeologiczna Europy w skali 1:1 500 000. [www.bgr.bund.de/ihme1500](http://www.bgr.bund.de/ihme1500)
- Bilby R. E., Bisson P. A., 1998. Funkcja i rozmieszczenie dużych szczytek drzewnych. *River Ecology and Management*, Springer-Verlag, Nowy Jork, s. 324-346.
- Brown R. N., Ek A. R., Kilgore M. A., 2007. Ocena standardów i praktyk dotyczących martwego drewna w stanie Minnesota. Wydział Zasobów Leśnych, Uniwersytet Minnesoty, USA, 45 s.
- ESDB, 2004. Europejska baza danych gleb, wersja 2.0, Komisja Europejska i Europejska Sieć Biur Glebowych, CD-ROM, EUR 19945 EN.
- Evrard, O., Heitz, C., Liégeois, M., Boardman, J., Vandaele, K., Auzet, A. V., C van Wesemael, B. 2010. Porównanie metod zarządzania mających na celu kontrolę powodzi błotnistych w środkowej Belgii, północnej Francji i południowej Anglii. *Degradacja gruntów i rozwój*, 21(4), 322-335.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: nowe powierzchnie klimatyczne o rozdzielczości przestrzennej 1 km dla globalnych obszarów lądowych. *International Journal of Climatology* 37, 4302-4315.
- Gorczyca E., Izmailow B., Krzemień K., Łyp M., Wrońska-Wałach D. 2016. Rzeźba i jej współczesne przemiany. W: Górecki A., Zemanek B. (red.) Bieszczadzki Park Narodowy—40 lat ochrony. Bieszczadzki Park Narodowy, Ustrzyki Górne, s. 51–68
- Haczewski G., Kukulak J., Bąk K. 2007. Budowa geologiczna i rzeźba Bieszczadzkiego Parku Narodowego. Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej w Krakowie, Kraków, Polska, s. 160
- Harmon M. E., Franklin J. F., Swanson F. J., Sollins P., Gregory S. V., Lattin J. D., Anderson N. H., Cline S. P., Aumen N. G., Sedell J. R., Lienkaemper G. W., Cromack K., Cummins K. W. 1986. Ekologia gruboziarnistych szczytek drzewnych w ekosystemach umiarkowanych, *Advances Ecological Research* 15, s. 133-276.
- Henkiel A. 1982. O pochodzeniu kratowej sieci rzecznej Beskidów Wschodnich. *Czas Geogr* 53:19–27
- Holling C. S. 1992. Morfologia, geometria i dynamika ekosystemów w różnych skalach. *Ecological Monographs* 62(4), s. 447-502.
- Hong, Y., Adler, R.F. 2008. Oszacowanie globalnych wartości krzywej SCS przy użyciu teledetekcji satelitarnej i danych geoprzestrzennych. *International Journal of Remote Sensing* 29, 471-477.
- Charman, P.E.V., Murphy, B.W. 1998. Gleby: ich właściwości i zarządzanie. Oxford University Press, USA, 464 str.
- Christensen, M., Katrine, H., Mountford, E. P., Ódor, P., Standovár, T., Rozenbergar, D., Diaci, J., Wijdeven, S., Meyer, P., Winter, S., Vrska, T. 2005. – Martwe drewno w europejskich rezerwach lasów bukowych (*Fagus sylvatica*). *Forest Ecology and Management*, 210, 1-3, str. 267-282.
- Jankowski L., Margielewski W. 2021. Kontrola geologiczna morfologii młodych gór orogenicznych: od analizy geomorfologicznej do reinterpretacji geologii zewnętrznych Karpat Zachodnich. *Geomorfologia* 38:107749
- Kricsfalusy, V., Budnikov, G., C Lesio, I. 2010. Rzadkie i chronione gatunki roślin w Narodowym Parku Przyrody Užansky (Zakarpacie, Ukraina). *Thaiszia-Journal of Botany*, 20(2), 115-125.

- Lepeška, T. 2010. Potencjał wodny krajobrazu i zintegrowane zarządzanie dorzeczami rzek w regionach górskich i podgórszych. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 10(1), 13-24. <https://doi.org/10.2478/v10104-010-0017-9>
- Lepeška, T. 2013. Potencjał wodny wybranych dorzeczy na Słowacji. *Ecohydrology & Hydrobiology* 13, nr 3 (2013): 201-209.
- Lepeška T., Radecki-Pawlik A., Wojkowski J., Wałęga A. 2017. Potencjał wodny dorzecza rzeki Prądnik na Wyżynie Polskiej. *Acta Geoph.*, 65(6), s. 1253-1267
- Midriak, R. 1988. Funkcja przeciwerozyjna drzewostanu leśnego na Słowacji. *Acta Instituti Forestalis, Zvolen*, 7, 137-163.
- Midriak, R., Gajdošová, D., Herchl, A., Košút, M., Kubíny, D., Novosad, J., C Slivka, J. 1988. *Gospodarka leśna na obszarach torfowiskowych. Příroda*.
- Montgomery, D. R. 2007. Erozja gleby a zrównoważone rolnictwo. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272.
- Mostowik, K., Siwek, J., Kisiel, M., Kowalik, K., Krzysik, M., Plenzler, J., C Rzonca, B. 2019. Tendencje dotyczące spływu powierzchniowego w zmieniającym się klimacie we wschodnich Karpatach (Góry Bieszczady, Polska). *Catena*, 182, 104174.
- Naef, F., Scherrer, S., C Weiler, M. 2002. Ocena potencjału ograniczenia spływu powodziowego poprzez zmianę użytkowania gruntów w oparciu o procesy. *Journal of hydrology*, 2c7(1-2), 74-79.
- Neteler, M., Haas, J., C Metz, M. 2022. Cyfrowy model terenu (DEM) Copernicus dla Europy o rozdzielczości 100 metrów (EU-LAEA) opracowany na podstawie globalnego zbioru danych DEM Copernicus o rozdzielczości 30 metrów (1.0.0) [Zbiór danych]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6211990>
- O Dochartaigh, B., Doce, D. D., Rutter, H. K., C MacDonald, A. M. 2011. Podręcznik użytkownika: Zbiory danych GIS dotyczące wydajności warstw wodonośnych (Szkocja). Wersja 2.
- Panagos P. 2006. Europejska baza danych gleby. *GEO: connexion*, 5 (7), str. 32-33.
- Price, K. 2011. Wpływ topografii zlewni, gleb, użytkowania gruntów i klimatu na hydrologię przepływu podstawowego w regionach wilgotnych: przegląd. *Postępy w geografii fizycznej*, 35(4), 465-492.
- Rączkowska Z., Łajczak A., Margielewski W., Świąchowicz J. 2012. Najnowsza ewolucja rzeźby terenu w polskich Karpatach. W: Lóczy D, Stankoviansky M., Kotarba A. (red.) Najnowsza ewolucja rzeźby terenu: region karpacko-bałkańsko-dinarski. Springer, Dordrecht, s. 47-55
- Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., C Hanan, N. P. 2018. HYSOGs250m, globalne siatki hydrologicznych grup glebowych do modelowania spływu opartego na krzywej liczbowej. *Dane naukowe*, 5(1), 1-9.
- Sørensen, R., Zinko, U., C Seibert, J. 2006. O obliczaniu topograficznego wskaźnika wilgotności: ocena różnych metod w oparciu o obserwacje terenowe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101-112.
- Spies T., 1997. Struktura, skład i funkcja drzewostanu. W: Kohm K.A., Franklin J.F. (red.), Tworzenie leśnictwa na miarę XXI wieku: nauka o zarządzaniu ekosystemami. Island Press, Waszyngton, s. 11-30.
- Tóth, G., Weynants, M. 2016. Mapy wskaźników właściwości hydraulicznych gleby dla Europy, zbiór danych/mapy pobrane z Europejskiego Centrum Danych o Glebie. Dostępne pod adresem: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu>
- Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych, 2017. Podręcznik badania gleby. Personel Wydziału Badań Gleby; Podręcznik Służby Ochrony Gleby, tom 18.
- Viola, M. R., Mello, C. R., Beskow, S., C Norton, L. D. 2014. Wpływ zmian użytkowania gruntów na hydrologię górnego biegu dorzecza rzeki Grande w południowo-wschodniej Brazylii. *Zarządzanie zasobami wodnymi*, 28, 4537-4550.
- Wałęga, A., Młyński, D., Wojkowski, J., Radecki-Pawlik, A., Lepeška, T. 2020. Nowy model empiryczny wykorzystujący metodę potencjału wodnego krajobrazu do oszacowania mediany szczytowych przepływów w górskich zlewniach bez stacji pomiarowych. *Woda*, 12, 983. <https://doi.org/10.3390/w12040983>.
- Wemple, B. C., C Jones, J. A. 2003. Powstawanie spływów na drogach leśnych w stromym, górskim zlewni. *Water Resources Research*, 35(8).

- Wojkowski, J., Młyński, D., Lepeška, T., Wałęga, A., Radecki-Pawlik, A. 2019. Związek między potencjałem wodnym a przewidywalnością maksymalnego przepływu dla wybranych zlewni w Karpatach Zachodnich. *Sci. of the Tot. Environ.*, 683, 293-307.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.159>.
- Wojkowski, J., Wałęga, A., Radecki-Pawlik, A., Młyński, D., Lepeška, T. 2022. Wpływ zmian pokrycia terenu na potencjał wodny krajobrazu i przepływy rzeczne: Górna Wisła, Karpaty Zachodnie. *Catena*, 210, 105878, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105878>.
- Wojkowski J., Wałęga A., Młyński D., Radecki-Pawlik A., Lepeska T., Piniewski M., Kundzewicz Z. W. 2023. Czy tracimy zdolność magazynowania wody głównie z powodu zmian klimatu – Analiza potencjału wodnego krajobrazu w wybranych zlewniach w Europie Środkowo-Wschodniej, *Wskaźniki ekologiczne, ELSEVIER*, tom 154, 2023, Nr: 110913, s. 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110913>